Palmira Pečiuliauskienė

Fizika

Išplėstinis kursas

11

Antroji knyga

ŠVIESA

Palmira Pečiuliauskienė

Fizika

Išplėstinis kursas

Vadovėlis klasei XI

Antroji knyga

ŠVIESA KAUNAS

UDK 53(075.3)
Pe23

Redaktorė ZITA ŠLIAVAITĖ

Dailininkė VYTAUTĖ ZOVIENĖ

Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos rekomenduota 2008 03 18, Nr. 25

Vadovėlis atitinka kalbos taisyklingumo reikalavimus

Pirmasis leidimas 2008

Palmira Pečiuliauskienė
FIZIKA
Išplėstinis kursas
Vadovėlis XI klasei
Antroji knyga

Dailininkė *Vytautė Zovienė*
Redaktorė *Zita Šliavaitė*
Viršelis *Kristinos Jėčiūtės*

Tir. 10 000 egz. Leid. Nr. 16 389. Užsak. Nr. 1210.
Uždaroji akcinė bendrovė leidykla „Šviesa“,
E. Ožeškienės g. 10, LT-44252 Kaunas.
El. p. mail@sviesa.lt
Interneto puslapis http://www.sviesa.lt
Spausdino UAB „Sapnų sala“,
S. Moniuškos g. 21, LT-08121 Vilnius.
Sutartinė kaina

ISBN 978-5-430-05031-3

Turinys

MECHANIKA

7. Tvermės dėsniai mechanikoje

8. Mechaniniai svyravimai ir bangos

9. Reliatyvumo teorijos pradmenys

ŠILUMINIAI REIŠKINIAI

10. Molekulinės kinetinės teorijos pagrindai

11. Termodinamika

12. Garai ir skysčiai

13. Kietieji kūnai

ELEKTRA

14. Elektrostatika

Laboratoriniai darbai

Mechanika

7 Tvermės dėsniai mechanikoje

Taikant Niutono mechanikos dėsnius, galima spręsti visus uždavinius, susijusius su kūnų sąveika. Tačiau kartais būna sunku rasti sąveikos jėgas, o jų nežinant, nepavyksta nustatyti pagreičio, taigi ir greičio bei poslinkio. Pavyzdžiui, remiantis Niutono dėsniais, keblu ieškoti raketos ir iš jos ištekančių dujų sąveikos jėgos, susiduriančių automobilių sąveikos jėgos. Sprendžiant šiuos ir panašius uždavinius, pasitelkiami nauji fizikiniai dydžiai: jėgos impulsas ir kūno judesio kiekis, bei jau žinomas dydis energija. Nustatyta, kad jie, kūnams sąveikaujant, nekinta, yra tvarūs. Svarbiausi tvariųjų dydžių sąryšiai buvo pavadinti tvermės dėsniais.

Tvermės dėsniai galioja įvairiems fizikiniams reiškiniams: mechaniniams, šiluminiams, elektriniams. Tvarieji dydžiai nekinta ir sąveikaujant atomams bei elementariosioms dalelėms.

7.1. Judesio kiekis

Pagrindinės sąvokos

Jėgõs impùlsas, jùdesio kiẽkis.

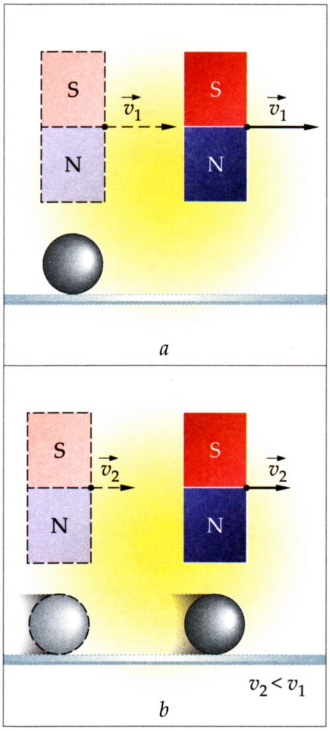
Jėgos impulsas

Kūnų sąveika priklauso ne tik nuo jėgų didumo, bet ir nuo sąveikos trukmės. Atlikime keletą bandymų.

Ant stiklinės plokštelės padėkime plieninį rutuliuką ir virš jo greitai neškime magnetą. Rutuliukas vos vos pajudės (7.1.1 pav., *a*). Pakartokime bandymą, magnetą nešdami lėtai. Šį kartą rutuliukas seks iš paskos (7.1.1 pav., *b*).

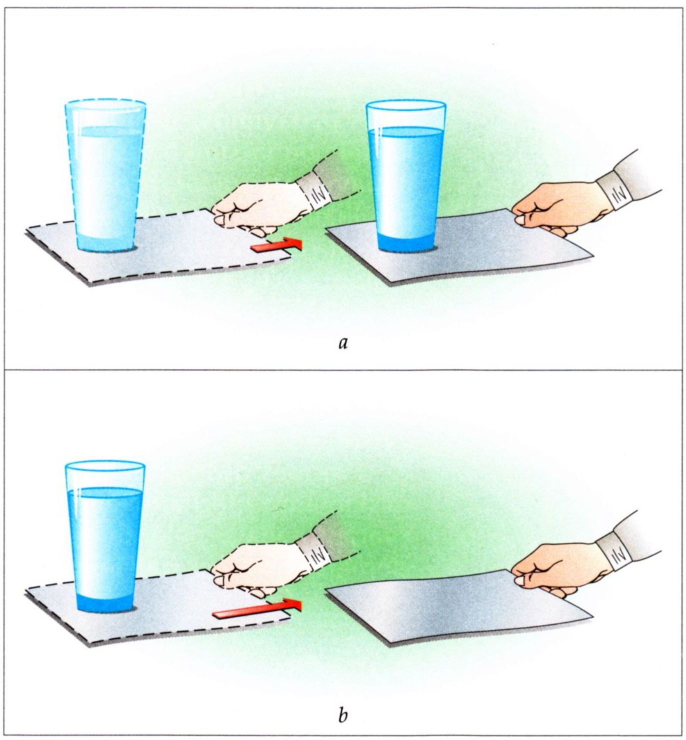
Ant stalo padėkime popieriaus lapą, o ant jo pastatykime stiklinę. Jei lapą trauksime lėtai, stiklinė ims slinkti kartu su juo (7.1.2 pav., *a*), jei greitai – nepajudės iš vietos (7.1.2 pav., *b*).

Šie bandymai rodo, kad kūnų sąveikos rezultatas priklauso ne tik nuo kūnus veikiančios jėgos, bet ir nuo sąveikos trukmės. Todėl jėgos poveikiui api-



7.1.1 pav.

7.1.2 pav.



būdinti vartojamas fizikinis dydis, vadinamas ***jėgõs impùlsu*** (lot. *impulsus* – smūgis, postūmis). ***Jėgos impulsas lygus jėgos $\vec{F}$ ir jos veikimo trukmės Δt sandaugai.*** Jėgos impulsas $\vec{F}\Delta t$ yra vektorinis dydis. Jo kryptis visada sutampa su jėgos kryptimi.

Kūno judesio kiekis

Tarkime, kad nuožulniąja plokštuma slysta pakelis miltų. Jo masė 2 kg, o greitis 5 m/s. Nuožulniosios plokštumos apačioje pakelį galime lengvai sulaikyti rankomis. Tačiau jei šia plokštuma tuo pačiu greičiu slystų maišas smėlio, kurio masė 50 kg, jo sugriebti rankomis tikrai nepavyktų.

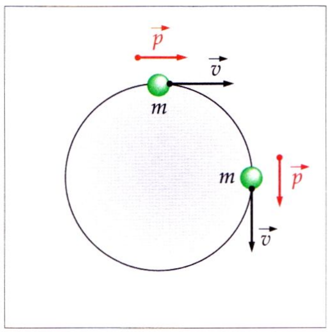
Aptarkime kitą pavyzdį. 8 g masės kulkai, lekiančiai 5 m/s greičiu, sulaikyti pakanka audinio ar popieriaus atraižos, o skriejančią 850 m/s greičiu ją galėtų sustabdyti tik trys labai storos medinės lentos.

Pateikti pavyzdžiai rodo, kad, norint apibūdinti kūno judėjimą, nepakanka žinoti vien jo masę arba greitį. Reikia atsižvelgti į abu šiuos dydžius. ***Fizikinis dydis, lygus kūno masės ir greičio sandaugai, vadinamas kū̃no jùdesio kiekiù.*** Pažymėję jį, kaip įprasta, raide $\vec{p}$, galime užrašyti matematinę judesio kiekio apibrėžimo išraišką:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \tag{7.1}$$

SI sistemoje kūno judesio kiekio matavimo vienetas yra *kilogrammètras per sekùndę* (kg · m/s). Tai 1 kg masės kūno, judančio 1 m/s greičiu, judesio kiekis.

Judesio kiekis yra vektorinis dydis. Jo kryptis sutampa su kūno greičio kryptimi (7.1.3 pav.).



7.1.3 pav.

Jėgos impulso ir kūno judesio kiekio ryšys

Tarkime, kad iš pradžių masės m kūnas judėjo greičiu $\vec{v}_0$. Tam tikru momentu jį paveikė kitas kūnas, ir sąveika truko laiką Δt. Po sąveikos kūnas ėmė judėti greičiu $\vec{v}$. Taigi sąveikaudamas kūnas įgijo pagreitį $\vec{a}$:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}. \tag{7.2}$$

Antra vertus, iš antrojo Niutono dėsnio išplaukia, kad

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (7.3)$$

Sulyginę (7.2) ir (7.3) lygybių dešiniąsias puses, gauname:

$$\frac{\vec{F}}{m} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}, \quad (7.4)$$

arba

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0; \quad (7.5)$$

čia $\vec{F}\Delta t$ – jėgos impulsas, $m\vec{v}_0$ – kūno judesio kiekis iki sąveikos, $m\vec{v}$ – kūno judesio kiekis po sąveikos. Vadinasi, pagal (7.5) formulę ***kūno judesio kiekio pokytis lygus jėgos impulsui.***

Atsižvelgę į tai, kad kūno judesio kiekis žymimas raide $\vec{p}$, (7.5) formulę galime užrašyti taip:

$$\vec{F}\Delta t = \vec{p} - \vec{p}_0. \quad (7.6)$$

Ši lygybė yra kita antrojo Niutono dėsnio išraiška. Ji taikoma tada, kai jėga veikia kūną labai trumpai, pavyzdžiui, kūnams susiduriant. (7.6) formulėje dydis $\vec{F}$ yra kūną veikianti vidutinė jėga.

Jeigu jėga ilgainiui kinta, jos veikimo trukmę galime padalyti į trumpesnius laikotarpius, kuriais jėga yra pastovi. Pagal (7.5) formulę apskaičiavę kūno judesio kiekio pokyčius per trumpus laiko tarpus ir juos sudėję, sužinome judesio kiekio pokytį per visą jėgos veikimo laiką.

Klausimai ir užduotys ??

1. Ką vadiname jėgos impulsu? Kokia yra jo kryptis?

2. Ką vadiname kūno judesio kiekiu? Kokia yra jo kryptis?

3. Kaip jėgos impulsas susijęs su kūno judesio kiekiu?

4. Kokiais vienetais matuojamas jėgos impulsas; kūno judesio kiekis? Ar skiriasi šie matavimo vienetai?

5. Kodėl maža jėga, veikianti kūną ilgesnį laiko tarpą, to kūno judėjimui turi tokią pat įtaką kaip ir didelė jėga, veikianti trumpai?

6. Apskaičiuokite 20 kg masės kūno, judančio 10 m/s greičiu, judesio kiekį.

7. Tuščio pienovežio masė 4 t, jo cisternos talpa 2 m³. Pieno tankis lygus 1028 kg/m³. Apskaičiuokite pienovežio judesio kiekį, kai:

a) pienovežis su sklidina cisterna važiuoja į pieninę 30 km/h greičiu; (50 466,7 kg · m/s)

b) pienovežis su tuščia cisterna važiuoja iš pieninės 60 km/h greičiu. (66 666,7 kg · m/s)

8. Stovėdamas ant ratukinių pačiūžų, 60 kg masės žmogus 4,2 m/s greičiu meta į priekį rutulį, sveriantį 10 kg. Kokiu greičiu ir kuria kryptimi judės žmogus, paleidęs rutulį? (0,7 m/s)

9. Automobilis, kurio masė 2 t, važiavo šiaurės kryptimi 90 km/h greičiu. Sankryžoje jis pasuko į rytus ir toliau važiavo tuo pačiu greičiu. Nustatykite automobilio judesio kiekio pokyčio kryptį ir modulį.

(Į pietryčius; $7{,}07 \cdot 10^4$ kg · m/s)

10. Kamuoliukas, kurio masė 0,1 kg, juda tolygiai apskritimu 10 m/s greičiu.

a) Pavaizduokite kamuoliuko judesio kiekio pokyčio vektorių po ketvirčio, pusės ir viso periodo.

b) Apskaičiuokite, kiek pakinta kamuoliuko judesio kiekis per ketvirtį, pusę ir visą periodą.

(14 kg · m/s; 20 kg · m/s; 0)

7.2. Judesio kiekio tvermės dėsnis

Uždaroji sistema

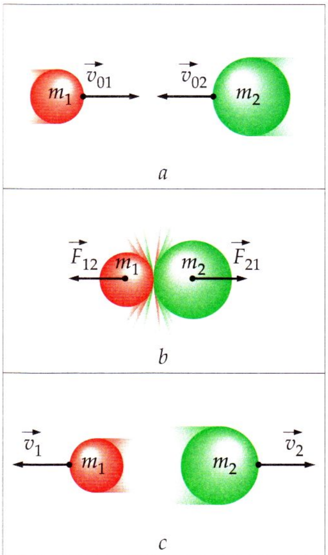
Pagrindinės sąvokos

Uždaróji sistemà, vidìnės jẽgos, reaktyvùsis judė́jimas.

Gamtoje kūnai veikia vienas kitą. Tačiau kūnų sąveika kartais esti labai silpna ir jos galima nepaisyti. Pavyzdžiui, nagrinėjant futbolininko kojos ir kamuolio sąveiką, galima neatsižvelgti į kamuolio ir žiūrovų sąveiką, apskaičiuojant erdvėlaivio trajektoriją Saulės sistemoje – į jo sąveiką su kitomis toli esančiomis žvaigždėmis, nagrinėjant berniuko judėjimą nuo vieno valties krašto iki kito – į trintį tarp vandens ir valties. Tokiais atvejais, kalbant apie kūnų sąveiką, vartojama uždarosios sistemos sąvoka. Grupė

kūnų, kurie nesąveikauja su jokiais kitais kūnais, nepriklausančiais tai grupei, vadinama ***uždarąja sistemà***. Jėgos, kuriomis uždarosios sistemos kūnai sąveikauja tarpusavyje, vadinamos ***vidìnėmis jėgomìs***. Išorinės jėgos uždarosios sistemos kūnų neveikia.

Judesio kiekio tvermės dėsnis



7.2.1 pav.

Tarkime, kad du rutuliukai, kurių masė m_1 ir m_2, sudaro uždarąją sistemą. Judėdami vienas priešais kitą greičiu $\vec{v}_{01}$ ir $\vec{v}_{02}$ (7.2.1 pav., *a*), jie susiduria. Smūgio metu antrasis rutuliukas veikia pirmąjį jėga $\vec{F}_{12}$, o pirmasis antrąjį – jėga $\vec{F}_{21}$ (7.2.1 pav., *b*). Pagal trečiąjį Niutono dėsnį šios jėgos yra lygios, bet priešingų krypčių:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \tag{7.7}$$

Remdamiesi antruoju Niutono dėsniu, užrašome:

$$\vec{F}_{12} = m_1\vec{a}_1, \qquad \vec{F}_{21} = m_2\vec{a}_2. \tag{7.8}$$

Įrašome šias jėgų išraiškas į (7.7) formulę:

$$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2. \tag{7.9}$$

Pirmojo rutuliuko greitį po sąveikos pažymėję $\vec{v}_1$, o antrojo – $\vec{v}_2$ (7.2.1 pav., *c*), išreiškiame rutuliukų pagreičius:

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_{01}}{\Delta t}, \qquad \vec{a}_2 = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_{02}}{\Delta t}.$$

Šias išraiškas įrašę į (7.9) lygybę, abi jos puses padauginę iš Δt ir pertvarkę, gauname:

$$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2. \tag{7.10}$$

Kairiojoje lygybės pusėje yra abiejų sąveikaujančių kūnų pradinių judesio kiekių suma, dešiniojoje – šių kūnų judesio kiekių, praėjus laikui Δt, suma. Kadangi abi sumos lygios, galime sakyti, kad sąveikaujančių kūnų judesio kiekių suma yra pastovi. Taigi ***jùdesio kiẽkio tvermẽs dė́snį*** galime suformuluoti taip: ***uždarosios sistemos kūnų judesio kiekių geometrinė suma yra pastovi, kai tos sistemos kūnai bet kaip sąveikauja vienas su kitu.***

Kūno judesio kiekis sąveikos metu kinta. Pavyzdžiui, pirmojo rutuliuko judesio kiekis iki susidūrimo buvo $\vec{p}_{01} = m_1\vec{v}_{01}$, o po sąveikos pasidarė $\vec{p}_1 = m_1\vec{v}_1$.

Judesio kiekis – vektorinis dydis. Jei kūnų judesio kiekių suma yra pastovi, tai ir jų projekcijų koordinačių ašyje suma yra pastovi. Todėl geometrinę judesio kiekių sudėtį galima pakeisti algebrine jų sudėtimi.

Judesio kiekio tvermės dėsnis gautas iš Niutono dėsnių, tačiau jo taikymo sritis platesnė. Šis dėsnis tinka ir mikrodalelių sistemoms. To negalima pasakyti apie Niutono dėsnius.

Reaktyvusis judėjimas

Akivaizdus judesio kiekio tvermės dėsnio taikymo praktikoje pavyzdys yra ***reaktyvùsis judė́jimas***. Taip vadinamas kūno judėjimas, sukeltas nuo to kūno tam tikru greičiu atsiskiriančios jo dalies. Pavyzdžiui, šūvio metu kulka atsiskiria nuo šautuvo ir šis pajuda atgal. Tokį reaktyvųjį šautuvo judesį, vadinamą atãtranka, jaučia šaulys. Reaktyviuoju vadinamas ir gaisrininkų naudojamos žarnos judesys, kai iš jos purškiamas vanduo. Šį judesį sustabdo gaisrininkų rankų jėga (7.2.2 pav.).

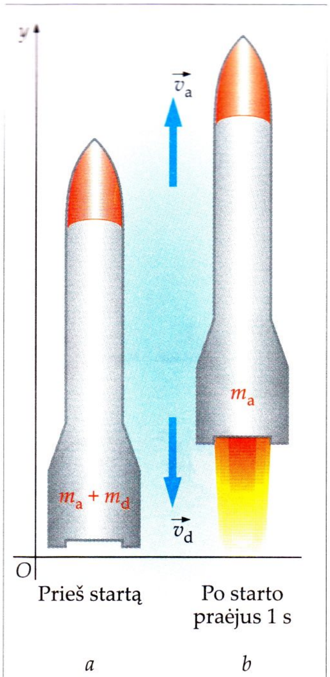
7.2.2 pav.

Dar vienas svarbus reaktyviojo judėjimo pavyzdys – raketų judėjimas. Raketa yra sudėtingas įrenginys, susidedantis iš šių pagrindinių dalių: kuro bakų, kuro degimo kameros, raketos aparatūros, astronautų kabinos. Supaprastinus raketos sandarą, galima teigti, kad ją sudaro apvalkalas ir viduje esantis kuras. Reaktyviųjų variklių (raketinių variklių) energijos šaltinis yra kuro ir deguonies mišinys.

Kokio dydžio gali būti raketa? Atsakyti ne taip paprasta, nes, raketai skriejant, nuo jos atsiskiria pakopos (žr. pirmosios knygos 5.11.1 pav.). Dėl to raketos matmenys kinta. Antai nešančioji raketa „Saturn“, naudota skrydžiams į Mėnulį, buvo didesnė už Big Beno bokštą. Ji turėjo penkis didelius variklius, pačius didžiausius iš naudotų iki tol. Pirmosios jos pakopos varikliai buvo 5 m ilgio ir svėrė 8,4 t. Atsiskyrus pirmajai pakopai, raketa „Saturn“ sutrumpėjo 5 m.

Raketos judėjimą sukelia dideliu greičiu iš jos išsiveržiančios dujos – kuro degimo produktai. Nuo ko priklauso raketos judėjimo greitis?

Norėdami atsakyti į šį klausimą, pritaikykime raketos judėjimui judesio kiekio tvermės dėsnį. Jeigu neatsižvelgsime į sunkio įtaką, sistemą „raketa ir dujos“ galėsime laikyti uždarąja. Raketos (apvalkalo) masę pažymėkime m_a, o joje esančių dujų masę – m_d.



7.2.3 pav.

Iš pradžių raketa nejuda (7.2.3 pav., *a*), todėl jos judesio kiekis atskaitos sistemoje, susietoje su Žeme, lygus nuliui. Po starto (7.2.3 pav., *b*) sistemos (raketos ir dujų) judesio kiekis taip pat turi būti lygus nuliui. Raketai startuojant, jos apvalkalas dėl sąveikos su dujomis įgyja tokio pat dydžio kaip ir dujos, bet priešingos krypties judesio kiekį. Raketos apvalkalo greitį pažymėkime $\vec{v}_a$, o iš raketos išlekiančių dujų greitį – $\vec{v}_d$. Supaprastindami uždavinio sprendimą, tarkime, kad dujos iš raketos išmetamos ne laipsniškai, bet iš karto. Tada

$$m_a(v_a)_y + m_d(v_d)_y = 0.$$

Atsižvelgę į greičio projekcijų pasirinktoje koordinačių ašyje ženklą, gauname:

$$m_a v_a = m_d v_d.$$

Iš čia

$$v_a = \frac{m_d}{m_a} v_d. \tag{7.11}$$

Iš (7.11) formulės matyti, kad raketos apvalkalo greitis priklauso nuo išmetamų dujų greičio: kuo didesniu greičiu išmetamos dujos, tuo didesnis raketos apvalkalo greitis. Išmetamų dujų greitis paprastai siekia apie 2 km/s. Antra vertus, raketos apvalkalo greitis priklauso nuo dujų ir apvalkalo masės santykio. Kad apvalkalas įgytų didelį greitį, kuro masė turi būti daug didesnė už apvalkalo, t. y. naudingosios raketos dalies, masę.

Raketa sąveikauja tik su besiveržiančiais iš jos kuro degimo produktais, todėl gali judėti tuštumoje. Kitos transporto priemonės, priešingai, juda sąveikaudamos su aplinkiniais kūnais, pavyzdžiui, automobilis – su keliu, garlaivis – su vandeniu.

Klausimai ir užduotys

1. Pateikite reaktyviojo judėjimo pavyzdžių.

2. Nuo ko priklauso raketos greitis?

3. Einant išilgai valties, plūduriuojančios ežere, valtis ima judėti į priešingą pusę. Paaiškinkite šį reiškinį.

4. Raketa greitėja ne tik ore, bet ir beorėje kosminėje erdvėje, kur nėra sąveikos su kitais kūnais. Ar tai neprieštarauja judesio kiekio tvermės dėsniui?

5. Kodėl erdvėlaiviams paleisti naudojamos daugiapakopės raketos?

6. Jonas čiuožykloje mokė mažąją sesutę čiuožti. Atsistūmę vienas nuo kito, jie nuslydo ledu į priešingas puses. Kiek kartų didesnį greitį įgijo sesutė, jeigu yra žinoma, kad Jono masė 1,5 karto didesnė nei sesutės?

Mokomės spręsti uždavinius

Kai kuriuos uždavinius lengviau spręsti taikant judesio kiekio tvermės dėsnį negu Niutono dėsnius.

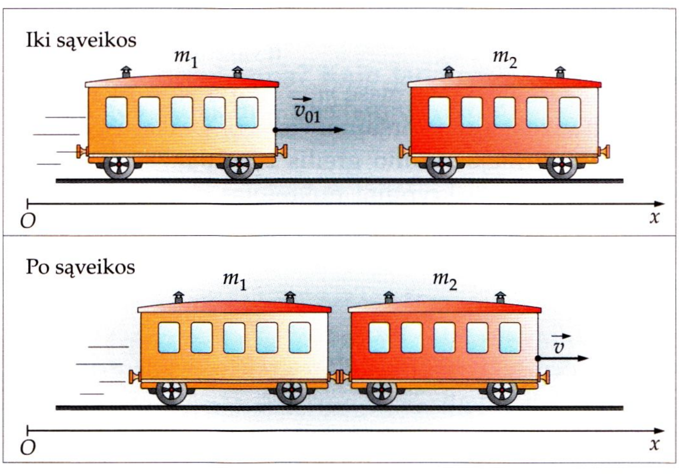
60 t masės vagonas, riedantis tiesiu geležinkelio ruožu 1 m/s greičiu, sukabinamas su nejudančiu vagonu, kurio masė 40 t. Kokiu greičiu važiuos sukabinti vagonai? Tarkime, kad trinties jėga yra labai maža.

v – ?	$m_1 = 60\text{ t} = 6\cdot10^4\text{ kg}$
	$m_2 = 40\text{ t} = 4\cdot10^4\text{ kg}$
	$v_{01} = 1\text{ m/s}$

Sprendimas

Kadangi trinties jėga labai maža, į jos poveikį galima neatsižvelgti. Vadinasi, sistema, susidedanti iš dviejų vagonų, yra uždara. Jai galime taikyti judesio kiekio tvermės dėsnį. Pagal jį pilnutinis abiejų vagonų judesio kiekis iki sukabinimo ir po jo (7.2.4 pav.) turi būti vienodas:

$$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = (m_1 + m_2)\vec{v}.$$



7.2.4 pav.

Užrašykime šią lygybę projekcijomis pasirinktoje koordinačių ašyje *Ox*:

$$m_1 v_{01x} + m_2 v_{02x} = (m_1 + m_2) v_x .$$

Kadangi visų greičio vektorių projekcijos yra teigiamos, be to, $v_{02} = 0$, tai

$$m_1 v_{01} = (m_1 + m_2) v.$$

Iš čia vagonų greitis po sukabinimo

$$v = \frac{m_1 v_{01}}{m_1 + m_2}.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$v = \frac{6 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}}{6 \cdot 10^4 \text{ kg} + 4 \cdot 10^4 \text{ kg}} = 0{,}6 \text{ m/s}.$$

Atsakymas: 0,6 m/s.

Užduotys savarankiškam darbui

1. 60 kg masės žmogus, bėgdamas 10 m/s greičiu, paveja 1 m/s greičiu riedantį vežimėlį ir užšoka ant jo. Vežimėlio masė 40 kg. Kokiu greičiu ima judėti vežimėlis kartu su žmogumi? (6,4 m/s)

2. Masės m kulka išlekia iš automato greičiu v. Kokį greitį įgyja automatas, jei yra žinoma, kad jo masė 500 kartų didesnė negu kulkos? $\left(\frac{v}{500}\right)$

3. Granata, skriejusi 20 m/s greičiu rytų kryptimi, sprogo į dvi dalis. 0,2 kg masės skeveldra nulėkė ta pačia kryptimi 500 m/s greičiu. Kuria kryptimi ir kokiu greičiu lėkė kita skeveldra, jei yra žinoma, kad granatos masė buvo lygi 1 kg? (Į vakarus 100 m/s greičiu)

4. Du rutuliai, kurių masė $m_1 = 1$ kg ir $m_2 = 2$ kg, rieda lygiu horizontaliu paviršiumi: vienas – į vakarus, kitas – į šiaurę. Pirmojo rutulio greitis $v_1 = 10$ m/s, antrojo – $v_2 = 5$ m/s. Kuria kryptimi nukreiptas sistemos judesio kiekis ir koks yra jo didumas?

(Šiaurės vakarų kryptimi; 14,14 kg · m/s)

5. Automobilio, kurio masė 2 t, judėjimas apibūdinamas lygtimi $x = 10 - 10t + 2{,}5t^2$.

a) Parašykite automobilio greičio priklausomybės nuo laiko lygtį.

b) Nubraižykite automobilio greičio grafiką.

c) Apskaičiuokite automobilio judesio kiekį pradiniu laiko momentu; po 2 s; po 5 s.

($2 \cdot 10^4$ kg · m/s; 0; $3 \cdot 10^4$ kg · m/s)

6. Vienas biliardo rutulys, judėdamas 10 m/s greičiu, atsimušė į kitą tokios pat masės nejudantį rutulį. Po smūgio abu rutuliai išsiskyrė. Apskaičiuokite rutulių greičius po smūgio, kai:

a) po susidūrimo rutulių trajektorijos sudarė su pradine rutulio judėjimo kryptimi 45° kampus;

(7,1 m/s; 7,1 m/s)

b) pirmo rutulio trajektorija su pradine trajektorija sudarė 60° kampą, o antro rutulio – 30° kampą.

(5 m/s; 8,7 m/s)

7.3. Mechaninis darbas

Bendroji mechaninio darbo išraiška

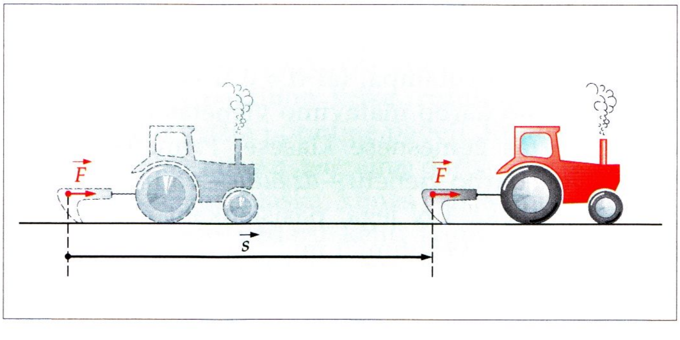
Pagrindinės sąvokos

Mechãninis dárbas,
suñkio dárbas,
trintiẽs dárbas.

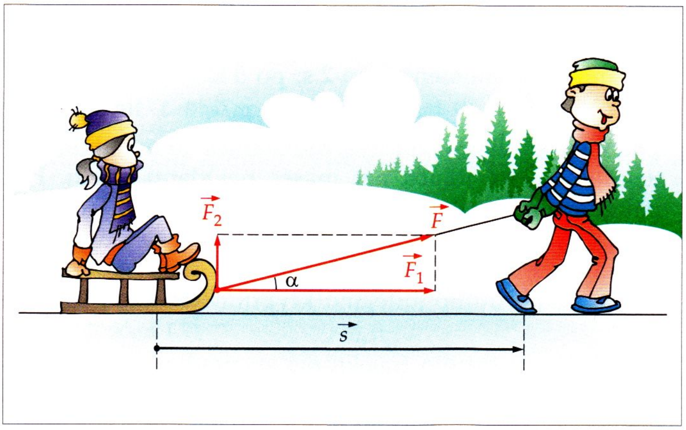
Mokydamiesi mechanikos pradmenų, sužinojote, kad buitinė ir fizikinė žodžio „darbas" prasmė ne visada sutampa. Turėtumėte atsiminti, kad, spręsdami fizikos ar matematikos uždavinius, jokio mechaninio darbo neatliekate, tačiau, bėgdami iš vieno namo aukšto į kitą, dirbate nemažai. Fizikiniu požiūriu mechaninis darbas atliekamas tada, kai jėgos veikiamas kūnas pasislenka. Jeigu kūną veikiančios jėgos $\vec{F}$ ir kūno poslinkio $\vec{s}$ kryptys sutampa (7.3.1 pav.), mechaninis darbas apskaičiuojamas pagal formulę

$$A = Fs. \qquad (7.12)$$

O jeigu nesutampa? Kaip tada rasti kūną veikiančios jėgos atliekamą mechaninį darbą?



7.3.1 pav.



7.3.2 pav.

Norėdami atsakyti į šį klausimą, remsimės brėžiniu (7.3.2 pav.). Jėgą $\vec{F}$, kuria berniukas traukia roges, galima įsivaizduoti kaip jėgų $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$ vektorinę sumą. Vertikalia kryptimi kūnas nejuda, todėl jėga $\vec{F}_2$ mechaninio darbo neatlieka. Vadinasi, jėgos $\vec{F}$ darbas lygus jėgos $\vec{F}_1$ darbui:

$$A = F_1 s. \quad (7.13)$$

Iš brėžinio matyti, kad jėgą F_1 galima išreikšti jėga F:

$$F_1 = F \cos \alpha.$$

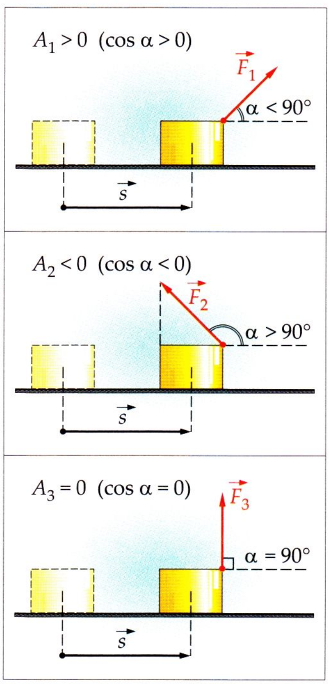
Todėl jėgos $\vec{F}$ darbas

$$A = Fs \cos \alpha. \quad (7.14)$$

Tai yra bendroji mechaninio darbo formulė. Iš jos matyti, kad ***darbas, kurį atlieka pastovi jėga, lygus jėgos ir poslinkio vektorių modulių sandaugai, padaugintai iš kampo tarp tų vektorių kosinuso.***

Kadangi sandauga $F \cos \alpha$ lygi jėgos $\vec{F}$ projekcijai poslinkio kryptyje (7.3.2 pav.), galime sakyti, kad *jėgos atliekamas darbas lygus poslinkio modulio ir jėgos projekcijos poslinkio kryptyje sandaugai.*

7.3.3 pav.



Iš (7.14) formulės išplaukia VIII klasėje gauta (7.12) mechaninio darbo išraiška. Iš tikrųjų, kai jėgos ir poslinkio kryptys sutampa, tai $\alpha = 0$ ir $\cos \alpha = 1$.

Mechaninio darbo matavimo vienetas taip pat buvo apibrėžtas žemesnėse klasėse. Primename, kad SI sistemoje darbo vienetu – *džauliu* – vadinamas darbas, kurį atlieka 1 N jėga, pasislenkant jos veikimo taškui tos jėgos kryptimi 1 m:

$$[A] = 1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}.$$

Mechaninis darbas yra ne vektorinis, o skaliarinis dydis. Jis neturi jokios krypties. Mechaninio darbo ženklą lemia jėgos $\vec{F}$ ir poslinkio $\vec{s}$ sudaromas kampas α (7.3.3 pav.):

- kai $0 \le \alpha < 90°$, tai $\cos \alpha > 0$ ir $A_1 > 0$;
- kai $90° < \alpha \le 180°$, tai $\cos \alpha < 0$ ir $A_2 < 0$;
- kai $\alpha = 90°$ (kitaip tariant, kai jėgos kryptis statmena judančio kūno poslinkio krypčiai), tai $\cos \alpha = 0$ ir $A_3 = 0$.

Trinties darbas visada yra neigiamas ($A < 0$), nes trinties jėgos ir poslinkio vektoriai priešpriešiniai. Įcentrinės jėgos darbas lygus nuliui, nes įcentrinė jėga kiekvienu laiko momentu statmena kūno judėjimo krypčiai.

Sunkio darbas

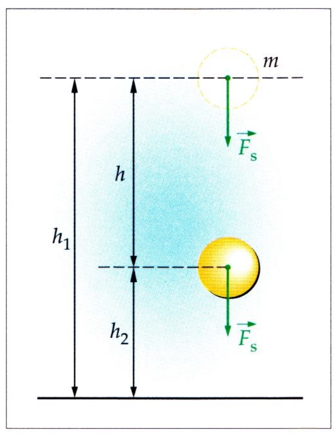
Sunkio darbo pavyzdžių nesunku aptikti mus supančioje aplinkoje. Dėl sunkio atliekamo darbo akmuo ritasi nuo skardžio, o rogutės leidžiasi nuo kalniuko. Priešingai, kopdami į kalną, lipdami aukštyn laiptais ar kopėčiomis, turime atlikti darbą, kad įveiktume sunkį (7.3.4 pav.).

7.3.4 pav.

Sunkio darbas apskaičiuojamas pagal bendrąją mechaninio darbo formulę. Pritaikykime ją, imdami pavyzdžiu vertikaliai žemyn krintantį rutuliuką, kurio masė m (7.3.5 pav.). Šiuo atveju sunkio kryptis sutampa su poslinkio kryptimi, o poslinkio modulis lygus aukščių h_1 ir h_2 skirtumui: $s = h = h_1 - h_2$, todėl sunkio darbas lygus jo modulio ir aukščių skirtumo sandaugai:

$$A = mgh. \quad (7.15)$$

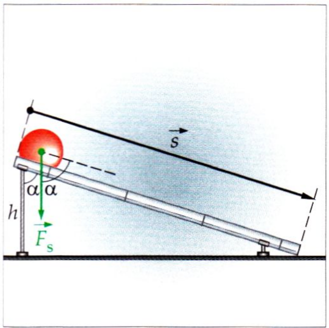
7.3.5 pav.



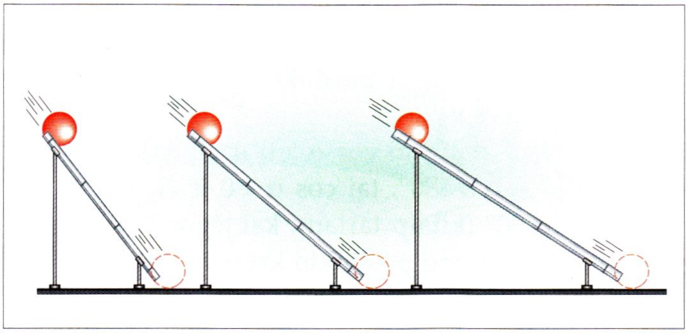
Jeigu rutuliukas metamas vertikaliai aukštyn, tai sunkis atlieka neigiamą darbą

$$A = -mgh,$$

nes jėgos ir poslinkio kryptys yra priešingos. Pasiekęs aukščiausią pakilimo tašką, rutuliukas pradeda kristi žemyn ir grįžta į pradinę padėtį. Rutuliukui leidžiantis, sunkis atlieka teigiamą darbą $A = mgh$. Jei, pasiekęs aukščiausią tašką, kūnas grįžta į pradinę padėtį, darbas tokiu uždaru keliu lygus nuliui. Tai – vienas iš sunkio ypatumų. *Sunkio darbas uždara trajektorija lygus nuliui.*



7.3.6 pav.



7.3.7 pav.

Apskaičiuokime darbą, kurį atlieka sunkis, veikdamas nuožulniąja plokštuma žemyn riedantį rutuliuką (7.3.6 pav.). Paleistas iš aukščio h, jis pasislenka atstumu s, lygiu nuožulniosios plokštumos ilgiui. Iš brėžinio matyti, kad $h = s \cos \alpha$. Įrašę šią išraišką į bendrąją darbo formulę (7.14), gauname sunkio darbo formulę $A = mgh$. Ji niekuo nesiskiria nuo (7.15) formulės. Vadinasi, sunkio darbas nepriklauso nuo to, ar kūnas juda vertikaliai, ar nueina ilgesnį kelią nuožulniąja plokštuma. Akivaizdu, kad 7.3.7 paveiksle pavaizduotais atvejais sunkis, veikiantis riedantį rutuliuką, atliks tokį pat darbą.

Taigi *sunkio darbas nepriklauso nuo kūno judėjimo trajektorijos. Jis visada lygus sunkio modulio ir aukščių pradinėje bei galinėje padėtyje skirtumo sandaugai.*

Du vienodos masės žmonės (7.3.4 pav.), nuožulniais laiptais ir vertikaliomis kopėčiomis užkopdami į tą patį aukštį, atlieka vienodą darbą, lygų juos veikiančio sunkio darbui. Tačiau lipti kopėčiomis reikia didesnės jėgos nei laiptais. Laiptai – nuožulnioji plokštuma, kuria laimima jėgos, bet pralaimima kelio.

Klausimai ir užduotys

1. Pateikite mechaninio darbo pavyzdžių.

2. Kokiomis sąlygomis mechaninis darbas yra teigiamas; neigiamas; lygus nuliui?

3. Ar atlieka darbą jėgos, veikiančios kūną jo poslinkiui priešinga kryptimi? Atsakymą pagrįskite.

4. Kokiomis kopėčiomis lipti lengviau: vertikaliomis ar pasviromis? Kodėl?

5. 15 cm storio sūrio gabalas perpjaunamas peiliu. Jį veikia 40 N jėga. Koks darbas tuo metu atliekamas?

(6 J)

6. Kada sunkiaatletis atlieka didesnį darbą: keldamas 100 kg masės svarmenį į 2 m aukštį ar 120 kg masės svarmenį į 1,5 m aukštį?

7. Sunkią, 200 kg sveriančią medinę dėžę darbininkai medinėmis sandėlio grindimis tolygiai patraukė 5 m, paskui partempė atgal. Trinties tarp grindų ir dėžės koeficientas lygus 0,5. Apskaičiuokite:

a) darbą, kurį darbininkai atliko traukdami dėžę pirmyn; (5 kN)

b) darbą, atliktą tempiant dėžę atgal; (5 kN)

c) visą darbininkų atliktą darbą; (10 kN)

d) visą dėžės poslinkį.

8. Keldamas krovinį į 20 m aukštį, kranas atlieka 98 kJ darbą. Kokia yra krovinio masė? (500 kg)

9. Ant horizontalaus paviršiaus padėta 62 kg masės dėžė. Ji tempiama 400 N jėga, kuri su horizontaliu paviršiumi sudaro 60° kampą.

a) Kokį darbą atliks veikianti jėga, tiesiai ir tolygiai paslinkdama dėžę 5 m? (100 J)

b) Kokį darbą atliks trinties jėga? Atsakymą pagrįskite.

c) Apskaičiuokite trinties tarp dėžės ir grindų paviršiaus koeficientą. (0,76)

7.4. Mechaninė galia

Mechaninė galia

Pagrindinės sąvokos

Mechãninė galià, varõs jėgà.

Buityje ir technikoje naudojamos mašinos bei įrenginiai, kurie smarkiai išplečia fizines žmogaus galimybes. Pavyzdžiui, automobiliai padeda judėti greičiau, nei bėga greičiausi pasaulio čempionai, ekskavatorius tranšėją iškasa sparčiau negu žmogus, o kranas tą patį krovinį pakelia greičiau už statybininkus. Visi minėti mechanizmai darbą atlieka daug greičiau nei žmogus. Tobulinant techniką, siekiama padidinti jos atliekamo darbo spartą. Fizikinis dydis, apibūdinantis mechanizmo atliekamo darbo spartą, vadinamas ***mechãnine galià***. ***Ji lygi atlikto darbo ir laiko, per kurį tas darbas atliktas, santykiui:***

$$N = \frac{A}{t}. \qquad (7.16)$$

Galia yra skaliarinis dydis, matuojamas *vãtais* (W). Mechanizmo galia lygi vienam vatui, jeigu jis per vieną sekundę atlieka vieno džaulio darbą:

$$[N] = 1\ \text{W} = 1\ \text{J/s}.$$

Technikoje dažnai vartojami kartotiniai galios vienetai – *kilovãtas* (kW) ir *megavãtas* (MW):

$$1\ \text{kW} = 10^3\ \text{W}, \qquad 1\ \text{MW} = 10^6\ \text{W}.$$

Kai kurių šiuolaikinių lengvųjų automobilių variklių galia

Automobilio markė	Pagaminimo metai	Variklio galia, kW	Automobilio markė	Pagaminimo metai	Variklio galia, kW
Audi A6	2000	82	Daewoo Lanos	2001	64
Audi A3	2001	75	Ford Focus	2001	97
Audi A4	2000	142	Honda Civic	2001	86
Alfa Romeo	2002	162	Hunday Atos	2001	40
Chevrolet-Cavalier	2003	112	Kia Rio	2001	55
Chrysler Voyager	2004	87	Mazda Demio	2001	46
Chrysler Neon	2001	112	Peugeot 206	2000	51
Citroen C3	2004	56	Rover 25	2001	46

Kitas mechaninio darbo apskaičiavimo būdas

Iš mechaninės galios formulės (7.16) galima išreikšti mechaninį darbą:

$$A = Nt. \tag{7.17}$$

Iš šios išraiškos išplaukia kitas mechaninio darbo matavimo vienetas:

$$1\ \text{J} = 1\ \text{W} \cdot \text{s}.$$

Taigi darbo matavimo vienetu galima laikyti darbą, kurį atlieka 1 W galios mechanizmas per 1 s. Toks vienetas vadinamas *vatsekùnde* (Ws).

Džaulis ir vatsekundė yra labai maži matavimo vienetai. Juos vartoti technikoje ir buityje būtų nepatogu, nes sunkiai sektųsi pildyti darbo apskaitos formas, skaičiuoti, kiek kainuoja darbas. Todėl praktikoje vartojami stambesni darbo matavimo vienetai – *kilovãtvalandė* (kWh) ir *megavãtvalandė* (MWh):

1 kWh = 1000 W · 3600 s = 3,6 · 10⁶ Ws = 3,6 · 10⁶ J,
1 MWh = 1 000 000 W · 3600 s = 3,6 · 10⁹ Ws =
= 3,6 · 10⁹ J.

Automobilio galia, varos jėga ir greitis

Kaip susiję šie trys dydžiai? Tarkime, kad automobilis važiuoja tiesiu kelio ruožu pastoviu greičiu. Tada jo variklio sukurtos varos jėgos modulis lygus pasipriešinimo jėgos moduliui. Šių jėgų kryptys yra priešingos. Automobilio variklio galią galima išreikšti taip: $N = \frac{A}{t}$. Įrašę į ją varos jėgos darbo išraišką, gauname naują mechaninės galios formulę:

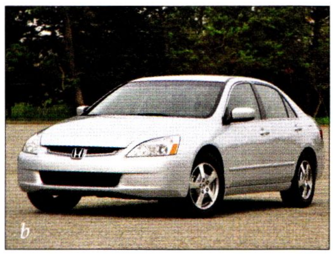
$$N = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = Fv. \qquad (7.18)$$

Iš jos matyti, kad automobilio galia lygi variklio varos (traukos) jėgos ir greičio modulių sandaugai. Šia priklausomybe naudojasi vairuotojai. Pavyzdžiui, važiuodami į kalną automobiliu, o ypač pilnutėliu autobusu, įkalnėje jie greitį sumažina įjungdami žemesnę pavarą. Tuomet padidėja variklio varos jėga.

Antra vertus, iš (7.18) formulės išplaukia, kad greitiems automobiliams reikia galingų variklių. Sportinių lenktyninių automobilių (7.4.1 pav., *a*) variklių galia yra didesnė negu kasdienėms reikmėms naudojamų automobilių (7.4.1 pav., *b*). Pavyzdžiui, sportinių automobilių galia siekia apie 300 kW, o lengvųjų automobilių – apie 100 kW.

Normaliomis sąlygomis žmogaus galia apytiksliai lygi 75 W, tačiau trumpalaikė gali siekti net kelis kilovatus.

a


b

7.4.1 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname galia? Koks tai dydis: vektorinis ar skaliarinis?

2. Kokie galios matavimo vienetai vartojami buityje ir technikoje? Kaip jie susiję?

3. Automobilis važiuoja horizontaliu keliu. Kada variklis įgyja didesnę galią: kai automobilis važiuoja greitai ar kai lėtai? Tarkime, kad jo varos jėga nekinta.

Mokomės spręsti uždavinius

1. Raimonda gyvena daugiabučio namo ketvirtame aukšte, todėl jai tenka kilti į 10 m aukštį. Kartą, kai liftas neveikė, mergina skubėdama užbėgo laiptais aukštyn per 20 s. Kokia buvo Raimondos galia, jei yra žinoma, kad jos masė lygi 60 kg?

N – ?	$h = 10$ m $t = 20$ s $m = 60$ kg

Sprendimas

Bėgdama laiptais, mergina turėjo įveikti sunkio trauką. Dėl to ji atliko darbą

$$A = mgh.$$

Vadinasi, Raimondos galią galime išreikšti taip:

$$N = \frac{mgh}{t}.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$N = \frac{60\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 10\ \text{m}}{20\ \text{s}} = 294\ \text{W}.$$

Atsakymas: 294 W.

2. Lėktuvas skrenda tiesiai ir tolygiai 950 km/h greičiu. Jo variklių galia lygi 1800 kW. Apskaičiuokime:

a) lėktuvo variklių varos jėgą;

b) lėktuvą veikiančią oro pasipriešinimo jėgą. Kaip ji kistų, jei lėktuvo greitis mažėtų?

F – ? F_p – ?	$v = 950$ km/h ≈ 264 m/s $N = 1800$ kW $= 1{,}8 \cdot 10^6$ W

Sprendimas

a) Žinome, kad variklio galia apskaičiuojama pagal formulę

$$N = Fv.$$

Iš čia išreiškiame lėktuvo variklių varos jėgą:

$$F = \frac{N}{v}.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$F = \frac{1{,}8 \cdot 10^6\,\mathrm{W}}{264\,\mathrm{m/s}} \approx 6818\,\mathrm{N} \approx 6{,}8\,\mathrm{kN}.$$

Atsakymas: 6,8 kN.

b) Kadangi lėktuvas skrenda tiesiai ir tolygiai, jį veikiančios oro pasipriešinimo jėgos $\vec{F}_p$ modulis lygus variklių varos jėgos $\vec{F}$ moduliui. Vadinasi,

$$F_p \approx 6{,}8\,\mathrm{kN}.$$

Mažėjant lėktuvo greičiui, mažėtų ir oro pasipriešinimo jėga.

Užduotys savarankiškam darbui

1. Kokį darbą per 1 min atlieka automobilio variklis, kurio galia 50 kW? (3 MJ)

2. Kokį darbą per metus atlieka:

a) Kauno hidroelektrinė, kurios generatorių vidutinė galia 100 MW; ($3{,}14 \cdot 10^{15}$ J)

b) Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė, kurios generatorių vidutinė galia 800 MW? ($25{,}2 \cdot 10^{14}$ J)

Palyginkite tuos darbus.

3. Į kokį aukštį per 1 min siurbliu galima pakelti 500 m^3 vandens? Siurblio galia 5 kW. (Į 6 cm aukštį)

4. Automobilis, kurio masė 2 t, važiuoja horizontaliu keliu 72 km/h greičiu. Pasipriešinimo jėga sudaro 0,05 automobilio svorio. Kokia yra automobilio galia? (20 kW)

5. Kranas per 0,5 min tolygiai pakėlė granito plokštę į 12 m aukštį. Plokštės tūris 2 m^3, granito tankis $2{,}5 \cdot 10^3$ kg/m^3. Apskaičiuokite krano galią. (20 kW)

6. Automobilis važiuoja horizontaliu keliu 5 m/s greičiu. Pakrauto automobilio masė 4 t, o variklio galia 75 AG. Apskaičiuokite riedėjimo trinties koeficientą. Primename, kad 1 AG = 735,5 W. (0,28)

7. Traktoriaus galia 50 kW.

a) Apskaičiuokite traktoriaus varos jėgą, kai jo greitis lygus 0,2 m/s; 0,6 m/s; 1,0 m/s; 1,4 m/s.
($2{,}5 \cdot 10^5$ N; $0{,}8 \cdot 10^5$ N; $0{,}5 \cdot 10^5$ N; $0{,}4 \cdot 10^5$ N)

b) Nubraižykite varos jėgos priklausomybės nuo traktoriaus greičio grafiką ir paaiškinkite gautą priklausomybę.

7.5. Kinetinė kūno energija

Pagrindinės sąvokos

Mechãninė enèrgija, kinètinė enèrgija.

Energijos samprata

Energijos sąvoka buityje vartojama labai dažnai. Buitinėms reikmėms naudojame įvairius mechanizmus, prietaisus, kurie vartoja vienokių ar kitokių šaltinių tiekiamą energiją: degančio kuro (dujų, naftos, anglių), branduolinę, krintančio vandens. Vadinasi, kiekvienas upelis, upė ar kalnų versmė yra energijos šaltinis, kuris gali būti vienaip ar kitaip panaudotas. Už energiją tenka mokėti, todėl labai svarbu ją vartoti taupiai ir efektyviai.

Kas yra energija, suprasti nelengva, nes tiesiogiai pojūčiais ji nesuvokiama, dėl to kartais klaidingai laikoma kažkokia nematoma medžiaga, kurios turi kūnas ir kuri gali pereiti iš vieno kūno į kitą. Įvairiais gamtos mokslų raidos laikotarpiais energija buvo vadinama skirtingai: šilumine jėga, gyvąja jėga ir net mirusiąja jėga. Tačiau ji nėra nematoma, paslaptinga medžiaga. Tad kas yra energija?

Mechaninės energijos samprata

Žodis „energija" kilęs iš graikų kalbos žodžio *energeia*, reiškiančio veikimą. Fizikoje energija apibrėžiama kaip galimybė atlikti darbą. Tačiau ne visada mus supantys kūnai jį gali atlikti. Pavyzdžiui, šalikelėje gulintis akmuo darbo atlikti negali, o esantis ant upelio skardžio – gali: krisdamas nuo skardžio į upelio vandenį, jis sukels vandens purslus. Vadinasi, šalikelėje gulintis akmuo mechaninės energijos neturi, o gulintis ant upelio skardžio – turi.

Mechãninė enèrgija – fizikinis dydis, rodantis, kokį darbą gali atlikti kūnas ar kūnų sistema.

Kaip ir darbas, mechaninė energija yra skaliarinis dydis. Ji matuojama džauliais:

$$[E] = 1\ \text{J}.$$

Taigi kūno arba kūnų sistemos energija apibrėžiama ir matuojama pagal tai, kokį darbą gali atlikti kū-

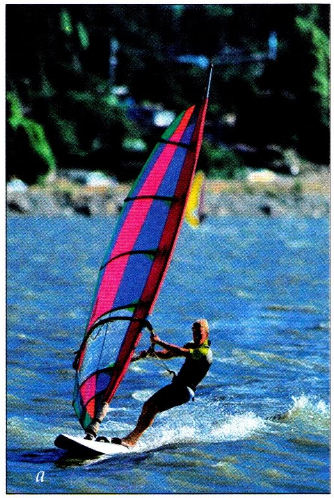
nas arba kūnų sistema. Mokydamiesi mechanikos pradmenų, sužinojote, kad jį gali atlikti deformuoti, pakelti arba judantys kūnai, taip pat suspaustos dujos.

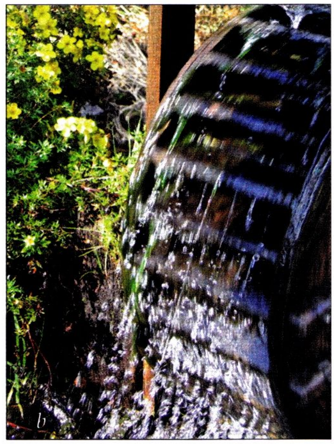
Kinetinės kūno energijos samprata

Aplink mus gausu pavyzdžių, iliustruojančių, kad judantys kūnai gali atlikti darbą. Pavyzdžiui, važiuojantis automobilis per avariją gali nulaužti medį ar stulpą, vėjas (judantis oro srautas) – sukti malūnų ar jėgainių sparnus, varyti vėjo roges, banglentes (7.5.1 pav., *a*), krintantis nuo užtvankos vanduo – sukti vandens malūno ratą (7.5.1 pav., *b*), hidroelektrinės turbiną, o judantys vandens garai – garo turbiną. Vadinasi, visi paminėti kūnai turi energijos. Energija, kurios turi judantys kūnai, vadinama ***kinètine enèrgija***[1] (gr. *kinēma* – judėjimas).

Jau žinote, kad kinetinė kūno energija priklauso nuo kūno masės ir greičio. ***Fizikinis dydis, lygus kūno masės ir greičio kvadrato sandaugos pusei, vadinamas kinètine enèrgija.*** Ji žymima E_k ir reiškiama formule

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \qquad (7.19)$$

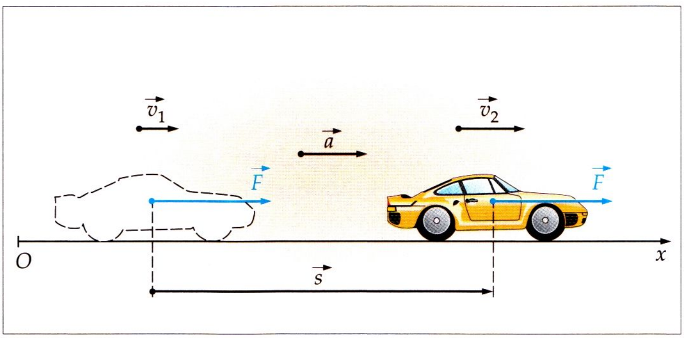




7.5.1 pav.

Darbas ir kinetinės energijos pokytis

Susiekime pastovios jėgos darbą ir kinetinės kūno energijos pokytį. Išnagrinėkime atvejį, kai masės m kūną veikia pastovi jėga $\vec{F}$ (ji gali būti ir kelių jėgų atstojamoji), be to, jėgos $\vec{F}$ ir poslinkio $\vec{s}$ vektoriai yra vienakrypčiai (7.5.2 pav.). Tada jėgos $\vec{F}$, poslin-



7.5.2 pav.

[1] Kinetinės energijos sąvoką pirmą kartą 1849 m. pavartojo žymus anglų mokslininkas Viljamas Tomsonas (*William Thomson*, 1824–1907).

kio $\vec{s}$, pagreičio $\vec{a}$ ir greičių $\vec{v}_1$ bei $\vec{v}_2$ projekcijos ašyje Ox lygios pačių vektorių moduliams. Automobilio (žr. 7.5.2 pav.) varos jėga $\vec{F}$ atlieka darbą

$$A = Fs. \quad (7.20)$$

Pagal antrąjį Niutono dėsnį varos jėgos $\vec{F}$ modulis išreiškiamas taip:

$$F = ma. \quad (7.21)$$

Tiesiai ir tolygiai kintamai judančio automobilio poslinkio modulį s galime išreikšti pradinio greičio $\vec{v}_1$, galinio greičio $\vec{v}_2$ bei pagreičio $\vec{a}$ moduliais:

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}. \quad (7.22)$$

Tada automobilio varos jėgos atliekamas darbas

$$A = Fs = ma\frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (7.23)$$

Dešiniojoje lygybės pusėje gavome dydžio $\frac{mv^2}{2}$ pokytį. Atsižvelgę į kinetinės energijos apibrėžimą (7.19), automobilio varos jėgos atliekamą darbą galime išreikšti jo kinetinės energijos pokyčiu:

$$A = E_{k2} - E_{k1}. \quad (7.24)$$

(7.24) formulę gavome remdamiesi greitėjančio judėjimo pavyzdžiu. Ją išvedėme taikydami antrąjį Niutono dėsnį, todėl (7.24) formulė tinka bet kokių jėgų atliekamam darbui skaičiuoti: tamprumo, trinties, visuotinės traukos jėgų (tarp jų ir sunkio). Ši formulė išreiškia vadinamąją ***kinètinės enèrgijos teorèmą***: ***kūną veikiančios jėgos (arba jų atstojamosios) darbas lygus kūno kinetinės energijos pokyčiui.*** Iš kinetinės energijos teoremos paaiškėja fizikinė šios energijos prasmė.

Fizikinė kinetinės energijos prasmė

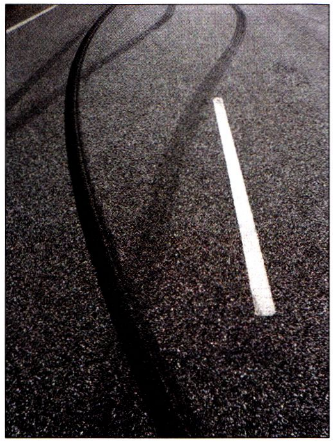
Tarkime, kad pradiniu momentu kūnas, kurio masė m, nejuda ($v_0 = 0$). Tai gali būti, pavyzdžiui, prie namo stovintis automobilis. Kad jis įgytų greitį v, varos jėga turi atlikti darbą A. Iš (7.24) lygybės išplaukia, jog

$$A = \frac{mv^2}{2} - 0 = \frac{mv^2}{2}. \quad (7.25)$$

Vadinasi, ***greičiu v judančio masės m kūno kinetinė energija lygi darbui, kurį turi atlikti kūną veikianti jėga, kad nejudantis kūnas įgytų greitį v.***

Tokio pat modulio darbas atliekamas ir sustabdant kūną. Kuo daugiau kinetinės energijos stabdymo pradžioje turi automobilis, tuo didesnį darbą stabdydama turi atlikti trinties jėga. Lentelėje pateikiame duomenis, rodančius, kaip automobilio stabdymo kelias priklauso nuo automobilio greičio stabdymo pradžioje:

Automobilio greitis, km/h	Stabdymo kelias, m	
	Sausas betonas	Šlapias betonas
40	8	12,5
60	18	28
80	32	50
120	72	112,5


7.5.3 pav.

Iš lentelės matyti: kuo didesnis greitis stabdymo pradžioje, tuo ilgesnis stabdymo kelias (7.5.3 pav.). Antra vertus, automobilio stabdymo keliui turi įtakos kelio danga. Stabdomas automobilis šlapiu keliu nuvažiuoja toliau. Tai puikiai išmano automobilių vairuotojai, tačiau praverstų žinoti ir pėstiesiems.

Klausimai ir užduotys ??

1. Kas yra kinetinė kūno energija? Koks tai dydis: skaliarinis ar vektorinis?

2. Ką teigia kinetinės energijos teorema?

3. Stabdant automobilį, trinties jėga atlieka neigiamą darbą. Kaip kinta stabdomo automobilio energija?

4. Remdamiesi lentelės duomenimis, nurodykite, kiek kartų pailgėja sausa danga važiuojančio automobilio stabdymo kelias, kai greitis padidėja dvigubai. Kokia yra ši priklausomybė?

5. Kiek kartų reikia padidinti kūno greitį, kad kinetinė energija padidėtų dvigubai?

6. Krovininio automobilio masė 10 t, pradinis greitis 36 km/h. Tolygiai greitėjančiai nuvažiavęs 200 m, automobilis įgijo 72 km/h greitį.

a) Apskaičiuokite automobilio varos jėgos atliktą darbą. (1,5 MJ)

b) Nustatykite, kokio dydžio buvo automobilio varos jėga. (7,5 kN)

7. Automobilis, kurio masė 2 t, važiavo 72 km/h greičiu. Ratų trinties į kelią jėga buvo lygi 6000 N. Kokio ilgio kelią įveikė automobilis, kol visiškai sustojo? (67 m)

8. Kūnas juda tolygiai 0,5 m spindulio apskritimu. Jo kinetinė energija lygi 10 J.

a) Apskaičiuokite kūną veikiančią jėgą. (40 N)

b) Nubraižykite aiškinamąjį brėžinį. Jame pažymėkite veikiančios jėgos kryptį.

c) Apskaičiuokite tos jėgos atliktą darbą.

7.6. Potencinė kūno energija

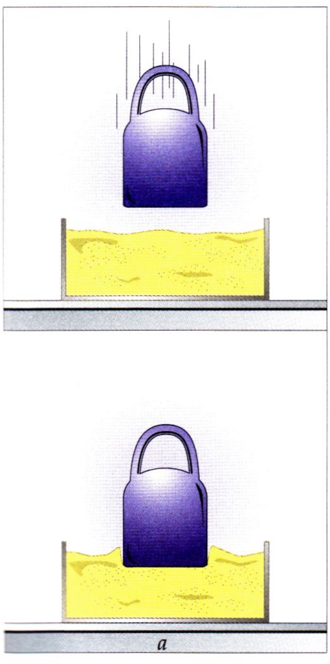
Pagrindinės sąvokos

Poteñcinė enèrgija, nùlinis lýgis.

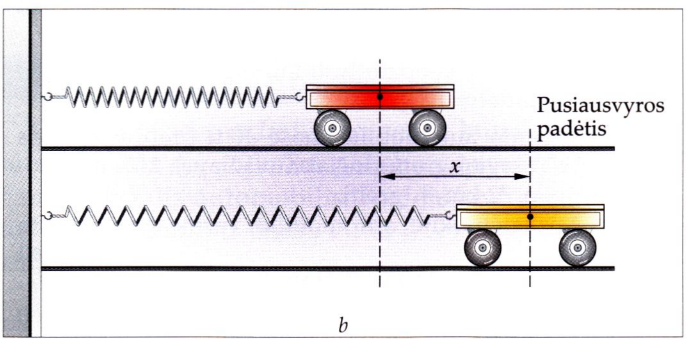
Potencinės energijos samprata

Skaitydami 7.5 temą, susipažinote su viena mechaninės energijos rūšimi – kinetine energija. Jos turi judantys kūnai, taigi kinetinė energija yra judėjimo energija. Dabar aptarsime kitą mechaninės energijos rūšį – ***poteñcinę enèrgiją*** (lot. *potentia* – jėga, galia). Jos, kaip žinome, turi deformuoti ir pakelti kūnai, nes gali atlikti darbą, pavyzdžiui, iš rankų iškritęs sunkus svarstis, nes smėlio dėžėje gali išmušti duobutę (7.6.1 pav., *a*); suspausta spyruoklė, nes gali priversti judėti prie jos pritvirtintą vežimėlį (7.6.1 pav., *b*).

Potencinės energijos negali turėti kūnas, nesąveikaujantis su kitais kūnais. Pakelto nuo žemės kūno potencinė energija – tai kūno ir Žemės sąveikos energija. Akivaizdu, jeigu Žemė svarsčio netrauktų, tai



7.6.1 pav.



paleistas jis nekristų žemyn ir neatliktų darbo. Jeigu atskiros kūno dalys neveiktų vienos kitų tamprumo jėgomis, deformuota spyruoklė taip pat negalėtų atlikti darbo. Deformuoti arba pakelti kūnai gali atlikti darbą, t. y. turi energijos, tik dėl sąveikos su kitais kūnais arba dėl atskirų kūno dalių tarpusavio sąveikos. Vadinasi, potencinė energija yra sąveikos energija. Ji apibūdina ne vieną kūną, bet kūnų sistemą. ***Energija, kurios turi pakeltas kūnas dėl sąveikos su kitais kūnais arba deformuotas kūnas dėl atskirų jo dalių tarpusavio sąveikos, vadinama poteñcine enèrgija.***

Sunkio veikiamo kūno potencinė energija

Nustatykime, nuo ko priklauso kūno, kurį veikia sunkis, potencinė energija. Ji nusako kūno gebėjimą atlikti darbą: kuo didesnį darbą gali atlikti kūnas, tuo daugiau potencinės energijos jis turi. Pavyzdžiui, iš to paties aukščio krintantis stambus krušos gabaliukas (≈10 g)[1] gali atlikti didesnį darbą nei mažytis lietaus lašelis (≈1 g). Pasiekęs Žemės paviršių, krušos gabaliukas gali sužaloti augalo lapą, o lietaus lašelis jam nepakenkia. Taigi abu šie kūnai, būdami tame pačiame aukštyje virš Žemės paviršiaus, turi nevienodai potencinės energijos: krušos gabaliukas daugiau negu lietaus lašelis, nes didesnė krušos gabaliuko masė. Vadinasi, sunkio veikiamo kūno potencinė energija priklauso nuo kūno masės: didesnės masės kūnai turi daugiau potencinės energijos.

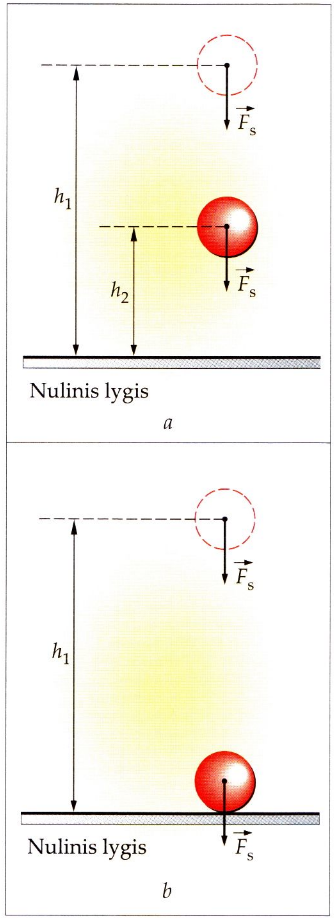
Sunkio veikiamo kūno potencinę energiją susiekime su tos jėgos atliekamu darbu. Pasinaudokime jau nagrinėtu pavyzdžiu (7.6.2 pav., *a*). Kai sunkio veikiamas rutuliukas krito iš aukščio h_1 į aukštį h_2, sunkis atliko darbą

$$A = mgh = mg(h_1 - h_2). \quad (7.26)$$

Atskliautę ir sukeitę dėmenis vietomis, gauname:

$$A = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (7.27)$$

Matome, kad sunkio darbas lygus dydžio mgh pokyčiui su priešingu ženklu. Pagal kinetinės energijos teoremą kūną veikiančios jėgos darbas lygus kūno kinetinės energijos pokyčiui. Taigi dydis mgh taip pat



7.6.2 pav.

[1] Atogrąžose, pliaupiant liūtims, krušos gabalų masė kartais siekia apie 2 kg.

yra energija. Tai – į aukštį h virš Žemės paviršiaus pakelto kūno potencinė energija. Fizikinis dydis, lygus kūno masės, laisvojo kritimo pagreičio modulio ir aukščio, į kurį kūnas pakeltas virš Žemės paviršiaus, sandaugai, vadinamas ***pakélto kū́no poteñcine enèrgija***. Potencinę energiją pažymėję raide E_p, gauname:

$$E_p = mgh. \quad (7.28)$$

Tada sunkio darbą galime išreikšti taip:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}). \quad (7.29)$$

Vadinasi, ***sunkio darbas lygus potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu.***

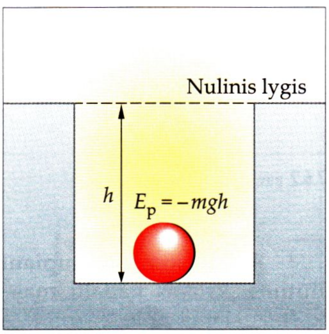
- Kai sunkis atlieka teigiamą darbą ($A > 0$), potencinė kūno energija mažėja. Pavyzdžiui, obuoliui krintant žemyn, sunkis atlieka teigiamą darbą, todėl potencinė obuolio energija mažėja, nes mažėja obuolio pakilimo aukštis Žemės paviršiaus atžvilgiu.

- Kai sunkis atlieka neigiamą darbą ($A < 0$), potencinė kūno energija didėja. Pavyzdžiui, kamuoliui kylant, didėja jo pakilimo aukštis Žemės paviršiaus atžvilgiu, o kartu ir potencinė energija.

Iš (7.29) formulės išplaukia sunkio veikiamo kūno potencinės energijos fizikinė prasmė. Tarkime, kad rutuliukas iš aukščio h_1 (7.6.2 pav., *b*) nusileidžia į ***nùlinį lỹgį***, t. y. aukštį ($h_2 = 0$), kuriame potencinė kūno energija lygi nuliui. Tada (7.26) formulė supaprastėja:

$$A = E_p. \quad (7.30)$$

7.6.3 pav.

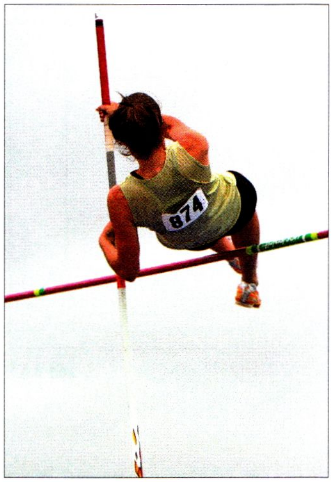


Sunkio veikiamo kūno potencinė energija lygi darbui, kurį atlieka sunkis, nuleisdamas kūną į nulinį lygį. Taigi sunkio veikiamo kūno potencinė energija priklauso nuo nulinio lygio. Tačiau jį galima pasirinkti laisvai. Dėl to tas pats kūnas skirtingo nulinio lygio atžvilgiu gali turėti nevienodai potencinės energijos. Pavyzdžiui, ant stalo padėtos knygos potencinė energija stalo paviršiaus atžvilgiu lygi nuliui, o grindų atžvilgiu nelygi nuliui.

Potencinė kūno energija, kitaip nei kinetinė, gali būti tiek teigiama, tiek neigiama. Pavyzdžiui, masės

m kūno, esančio gylio h duobėje, potencinė energija Žemės paviršiaus atžvilgiu yra neigiama (7.6.3 pav.).

Sunkio darbas, atliekamas kūnui pasislenkant, lygus potencinės energijos pokyčiui. Dėl to jis nuo pasirinkto nulinio lygio nepriklauso.

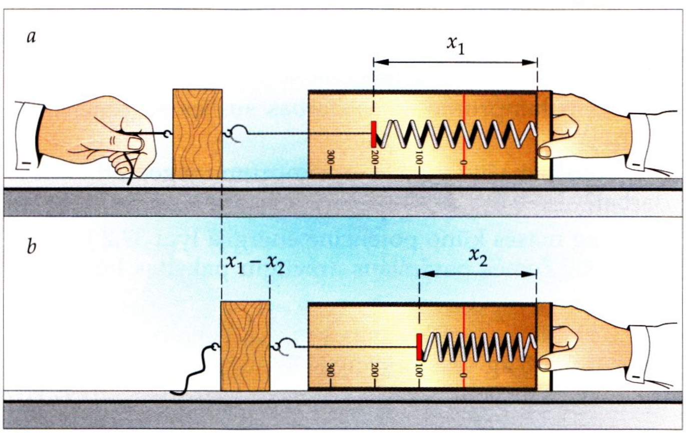


7.6.4 pav.

Tampriai deformuoto kūno potencinė energija

Jau minėjome, kad deformuoti kūnai gali atlikti darbą. Pavyzdžiui, deformuotos spyruoklės grąžina į pradinę padėtį durų rankeną ir automobilio amortizatorių, įtemptas lankas suteikia pagreitį strėlei, tušinuko spyruoklė keičia jo šerdies padėtį, deformuotas batuto pagrindas arba kartis palengvina sportininko šuolį (7.6.4 pav.). Šie ir kiti pavyzdžiai rodo, kad deformuoti kūnai turi potencinės energijos. Kaip galima ją apskaičiuoti? Kaip deformuoto kūno potencinė energija susijusi su tamprumo jėgos darbu?

Atsakyti į šiuos klausimus padės paprastas bandymas (7.6.5 pav.). Prie nedeformuotos spyruoklės, kurios standumo koeficientas k, prikabinkime tašelį. Spyruoklę ištempkime (7.6.5 pav., *a*) ir paleiskime tašelį. Veikiamas spyruoklės tamprumo jėgos, jis pradės judėti ir pasislinks tam tikru atstumu (7.6.5 pav., *b*). Apskaičiuokime darbą, kurį atliko tamprumo jėga, kol spyruoklės ilgis pakito nuo pradinės vertės x_1 iki galinės vertės x_2. Deformuojantis spyruoklei, tamprumo jėga F_t kinta, todėl, skaičiuojant darbą, imama vidutinė jos vertė $\overline{F}_t = \dfrac{kx_1 + kx_2}{2}$. Taigi



7.6.5 pav.

$$A = \overline{F}_t \Delta x = \frac{kx_1 + kx_2}{2}(x_1 - x_2) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right); \qquad (7.31)$$

čia Δx – tašelio poslinkio modulis.

Matome, kad tamprumo jėgos darbas lygus dydžio $\frac{kx^2}{2}$ pokyčiui. Šis fizikinis dydis vadinamas ***tam̃priai deformúoto kū̃no poteñcine enèrgija***:

$$E_p = \frac{kx^2}{2}. \qquad (7.32)$$

Iš (7.31) ir (7.32) formulės matyti, kad ***tamprumo jėgos darbas lygus tampriai deformuoto kūno potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu:***

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}). \qquad (7.33)$$

Kai spyruoklė grįžta į nedeformuotą padėtį ($x_2 = 0$), tai $E_p = A$. Vadinasi, ***tampriai deformuoto kūno potencinė energija lygi darbui, kurį atlieka tamprumo jėga, kūnui pereinant į nedeformuotą padėtį.***

Palyginę tamprumo jėgos darbo (7.31) ir sunkio darbo (7.27) išraiškas, matome, kad abiem atvejais jėgos atliekamas darbas priklauso tik nuo kūno pradinės bei galinės padėties ir nepriklauso nuo kūno judėjimo trajektorijos, todėl uždara trajektorija jis lygus nuliui.

Klausimai ir užduotys ??

1. Ką vadiname potencine kūno energija?

2. Kaip sunkio jėgos darbas susijęs su potencine energija?

3. Kaip tamprumo jėgos darbas susijęs su potencine energija?

4. Kuo panašūs sunkio ir tamprumo jėgos atliekami darbai?

5. 2 kg masės kūno potencinė energija lygi 39,2 J. Į kokį aukštį Žemės paviršiaus atžvilgiu pakeltas kūnas?

(Į 2 m aukštį)

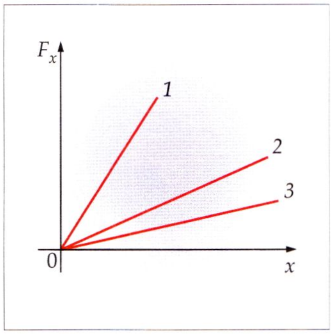
6. Kokį darbą, įveikdamas sunkį, atlieka sunkiaatletis, kai kelia 150 kg masės štangą į 2 m aukštį?

(2,94 kJ)

7. Ant prekystalio vienas šalia kito gulėjo penki vienodi anglų kalbos žodynai. Kiekvieno žodyno storis 1,96 cm, o masė 2 kg. Knygyno pardavėja juos sudėjo vieną ant kito. Kokį darbą ji atliko? (3,92 J)

8. Nedeformuota spyruoklė buvo suspausta du kartus: pirmą kartą – 3 cm, antrą kartą – 6 cm. Kiek kartų padidėjo spyruoklės potencinė energija?

9. 7.6.6 paveiksle grafiškai pavaizduota, kaip priklauso trijų spyruoklių tamprumo jėgos, atsirandančios suspaudžiant spyruokles, nuo jų pailgėjimo. Kuriuo atveju atliekamas didžiausias darbas? Atsakymą pagrįskite.



7.6.6 pav.

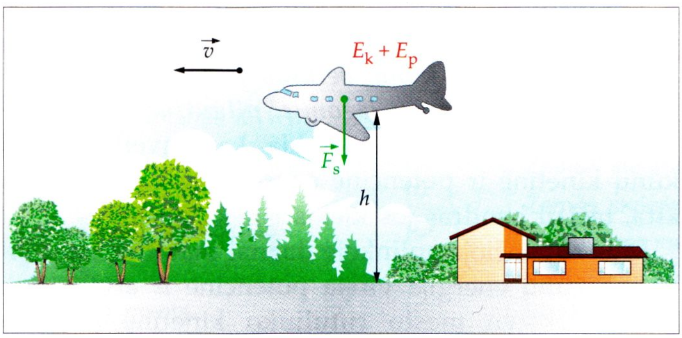
7.7. Energijos tvermės dėsnis mechaniniuose procesuose

Pilnutinės mechaninės energijos tvermės dėsnis

Pagrindinės sąvokos

Pilnutìnė mechãninė enèrgija.

Išsiaiškinome, kad potencinė energija apibūdina sąveikaujančius, o kinetinė – judančius kūnus. Tiek potencinė, tiek kinetinė energija dėl kūnų sąveikos kinta tik tada, kai juos veikiančios jėgos atlieka darbą. Anksčiau pavyzdžius nagrinėjome apsiribodami tik viena mechaninės energijos rūšimi – arba potencine, arba kinetine kūno energija. Tačiau sąveikaujantys kūnai gali turėti ir kinetinės, ir potencinės energijos. Pavyzdžiui, skrendantis lėktuvas (7.7.1 pav.) turi kinetinės energijos, nes juda, be to, sistema „Žemė ir



7.7.1 pav.

lėktuvas" turi potencinės energijos, nes lėktuvas ir Žemė sąveikauja gravitacijos jėga. Nagrinėdami lėktuvo judėjimą, atsižvelgiame tik į lėktuvo ir Žemės sąveiką, todėl darome prielaidą, kad pasipriešinimo jėgos lėktuvo neveikia. Vadinasi, sistema „Žemė ir lėktuvas" yra uždara.

Išsiaiškinkime, kaip kinta uždarosios sistemos sąveikaujančių kūnų energija. Jeigu keletas kūnų veikia vieni kitus tik gravitacijos bei tamprumo jėgomis ir jokių kitų išorinių jėgų nėra, tai tamprumo ir gravitacijos jėgų darbas lygus kūnų potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu (žr. 7.3 temą):

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}). \tag{7.34}$$

Antra vertus, tų pačių jėgų darbas pagal kinetinės energijos teoremą lygus kūno kinetinės energijos pokyčiui:

$$A = E_{k2} - E_{k1}. \tag{7.35}$$

Palyginę (7.34) ir (7.35) formulę, matome, kad uždarosios sistemos kūnų kinetinės ir potencinės energijos pokyčių moduliai yra lygūs, o ženklai – priešingi:

$$E_{k2} - E_{k1} = -(E_{p2} - E_{p1}). \tag{7.36}$$

Iš (7.36) formulės išeina, kad

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}. \tag{7.37}$$

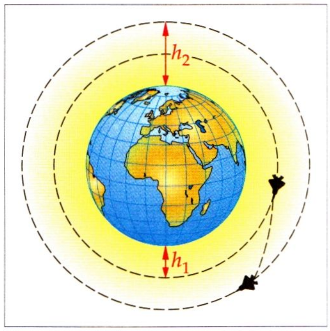
Abiejose lygybės pusėse yra kūno kinetinės ir potencinės energijos suma, vadinama ***pilnutinė mechãninė enèrgija***. (7.37) formulė rodo, kad kūno pilnutinė mechaninė energija yra pastovi. Ši formulė yra matematinė energijos tvermės dėsnio išraiška.

Vartojant pilnutinės mechaninės energijos sąvoką, energijos tvermės dėsnį galima formuluoti taip: ***uždarosios sistemos kūnų, veikiančių vienas kitą gravitacijos ir tamprumo jėgomis, pilnutinė mechaninė energija nekinta.*** Iš jo išplaukia, kad sąveikaujančių kūnų kinetinė ir potencinė energija gali virsti viena kita, tačiau bendras jos kiekis išlieka pastovus.

Mus supančioje aplinkoje dažnai matome, kaip kinetinė kūnų energija virsta potencine ir atvirkščiai. Antai aukštyn mesto rutuliuko kinetinė energija

mažėja, o potencinė didėja. Krintančio, atvirkščiai, potencinė energija mažėja, o kinetinė didėja.

Skriedamas apskrita orbita aplink Žemę, palydovas turi tam tikrą kiekį pilnutinės mechaninės energijos (7.7.2 pav.). Kai raketinis variklis perkelia jį į aukštesnę orbitą, palydovo potencinė energija Žemės paviršiaus atžvilgiu padidėja. Šia orbita palydovas juda mažesniu greičiu, taigi jo kinetinė energija sumažėja. Tačiau peršokusio iš vienos orbitos į kitą palydovo pilnutinė mechaninė energija išlieka pastovi.



7.7.2 pav.

Energijos tvermės dėsnis rodo: jei kūną veikiančios jėgos darbas *didina* kinetinę kūno energiją, tai tuo pat metu *mažina* potencinę jo energiją ir atvirkščiai. Vadinasi, mechaninis darbas lygus vienos rūšies energijai, virtusiai kitos rūšies energija.

Pilnutinės mechaninės energijos tvermės dėsnis procesuose, kurie vyksta dėl gravitacijos ir tamprumo jėgų veikimo, yra vienas svarbiausių mechanikos dėsnių. Jį žinant, galima paprasčiau išspręsti daugelį praktinių uždavinių. Energijos tvermės dėsnis gautas iš Niutono dėsnių, tačiau jo taikymo ribos platesnės nei Niutono dėsnių. Pavyzdžiui, jis taikomas elementariosioms dalelėms, kurioms Niutono dėsniai negalioja. Energijos tvermės dėsnis galioja ne tik fizikoje, bet ir visuose gamtos moksluose: biologijoje, chemijoje ir t. t.

Lentelėje pateikiame kai kurių kūnų ir fizikinių reiškinių mechaninės energijos vertes.

Fizikinių reiškinių ir kūnų mechaninė energija

Fizikinis reiškinys, kūnas	Energija, J	Fizikinis reiškinys, kūnas	Energija, J
Kambario oro molekulė	10^{-21}	Uraganas	10^{15}
Elektronas atome	10^{-18}	Žemės drebėjimas (8 balų pagal Richterio skalę)	10^{18}
Kompiuterio klavišas	10^{-2}	Ugnikalnio išsiveržimas	10^{19}
Širdies tvinksnis	0,5	Saulės energija, tenkanti Žemei per metus	10^{25}
Obuolys, krintantis iš 1 m aukščio	1	Žemės sukimasis apie ašį	10^{29}
Degantis degtukas	10^{3}	Žemės skriejimas aplink Saulę	10^{33}
1 m^3 malkų sudegimas	10^{9}	Saulės per metus išspinduliuota energija	10^{34}
Žaibas	10^{10}	Visatos gimimas	10^{68}
Kosminė raketa	10^{11}		

Energijos virsmai

Sąveikaujančių kūnų pilnutinė mechaninė energija tvari yra tik tada, kai kūnai sudaro uždarąją sistemą. Mus supančioje aplinkoje sąveikaujančių kūnų sistemos dažniausiai nėra uždaros, nes kūnus veikia trinties ir oro pasipriešinimo jėgos. Tokiais atvejais pilnutinės mechaninės energijos tvermės dėsnis negalioja. Pavyzdžiui, stabdomo automobilio kinetinė energija mažėja, o sustojusio išnyksta. Potencinė energija tuo metu nekinta. Kur dingsta kinetinė automobilio energija? Atsakysime įvertinę kitus veiksnius, kurie reiškiasi stabdant automobilį: kaista stabdžių trinkelės, padangos, asfaltas. Trindamiesi kūnai šyla ir dėl to vidinė jų energija didėja. Vadinasi, trinties jėgų veikiamo automobilio kinetinė energija neišnyksta. Ji virsta molekulių šiluminio judėjimo energija. Tikslūs matavimai rodo, kad dėl trinties jėgų poveikio kinetinė kūno energija sumažėja tiek pat, kiek padidėja vidinė jo energija.

Potencinė kūno energija gali virsti kinetine ir atvirkščiai. Dalis mechaninės energijos gali virsti nemechanine (vidine) energija, t. y. kūną sudarančių dalelių energija.

Bet kaip sąveikaujant kūnams, energija savaime neatsiranda ir neišnyksta, tik vienos rūšies energija virsta kitos rūšies energija. Šis teiginys vadinamas *enèrgijos tvermẽs désniu.*

Klausimai ir užduotys ??

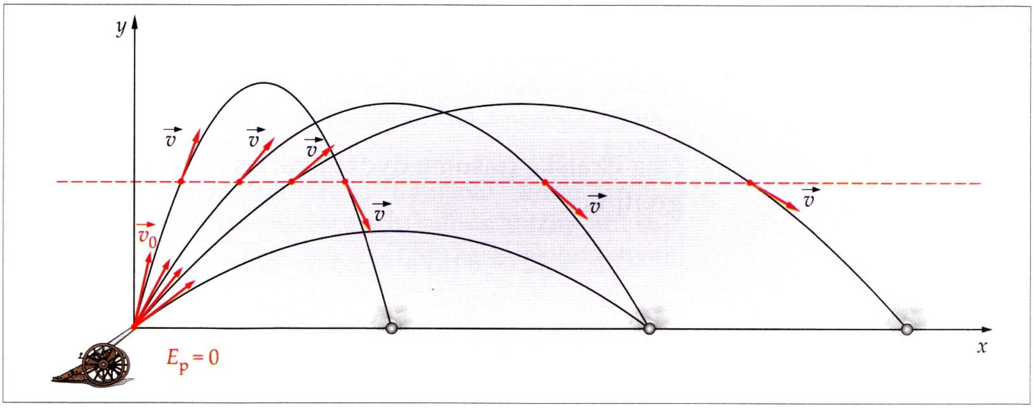
1. Ką vadiname pilnutine mechanine kūnų sistemos energija? Kokioms sistemoms galioja energijos tvermės dėsnis?

2. Ar pastovi yra pilnutinė mechaninė kūno energija, kai tas kūnas juda veikiamas trinties jėgos? Kodėl?

3. Lietaus lašas nukrito žemėn. Kur dingo potencinė lašo energija?

4. Kokie energijos virsmai vyksta hidroelektrinėje?

5. Palyginkite iš patrankos įvairiais kampais iššautų sviedinių (7.7.3 pav.) kinetinę energiją tame pačiame aukštyje. Atsakymą pagrįskite.



7.7.3 pav.

Mokomės spręsti uždavinius

Tenisininkas meta teniso kamuoliuką vertikaliai aukštyn. Paleistas iš 2 m aukščio salės grindų atžvilgiu, kamuoliukas pakyla į 3,5 m aukštį virš grindų. Kokiu greičiu jis buvo išmestas?

v_1 – ?	h_1 = 2 m h_2 = 3,5 m

Sprendimas

Tarkime, kad sistema, sudaryta iš teniso kamuoliuko ir Žemės, yra uždara. Pritaikykime jai pilnutinės mechaninės energijos tvermės dėsnį:

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}. \quad (1)$$

Nustatydami potencinę kamuoliuko energiją, nuliniu lygiu pasirinkime kamuoliuko išmetimo vietą. Tada išmetimo taške potencinė energija bus lygi nuliui ($E_{p1} = 0$), o kinetinė $E_{k1} = \frac{mv_1^2}{2}$. Aukščiausiame pakilimo taške kinetinė kamuoliuko energija lygi nuliui ($E_{k2} = 0$), o potencinė

$$E_{p2} = mgH = mg(h_2 - h_1).$$

Iš pilnutinės mechaninės energijos tvermės dėsnio (1) išplaukia, kad

$$\frac{mv_1^2}{2} = mg(h_2 - h_1).$$

Iš gautos lygybės išreiškiame pradinį kamuoliuko greitį:

$$v_1 = \sqrt{2g(h_2 - h_1)}.$$

Į šią išraišką įrašome dydžių vertes ir apskaičiuojame greitį v_1:

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot 9{,}8\ \mathrm{m/s^2} \cdot (3{,}5\ \mathrm{m} - 2\ \mathrm{m})} \approx 5{,}4\ \mathrm{m/s}.$$

Atsakymas: 5,4 m/s.

Užduotys savarankiškam darbui

1. Plaukdama į nerštavietę upės aukštupyje, lašiša pasiekė 2 m aukščio krioklį.

a) Apskaičiuokite, kokiu greičiu ji turi iššokti iš vandens, kad įveiktų krioklį. (≈6,3 m/s)

b) Nurodykite, ar lašišos greitis priklauso nuo jos kūno masės. Atsakymą pagrįskite.

2. Į kokį didžiausią aukštį pakils akmuo, mestas aukštyn 20 m/s greičiu? (Į 20,4 m aukštį)

3. Sportininkas šoka 5 m/s greičiu nuo 5 m aukščio tramplino į vandenį. Kokiu greičiu jis pasiekia vandens paviršių? (11,1 m/s)

4. Lėktuvas skrenda 9,2 km aukštyje virš Žemės paviršiaus 1080 km/h greičiu. Potencinės energijos nuliniu lygiu pasirinkę Žemės paviršių, nustatykite, kurią lėktuvo pilnutinės mechaninės energijos dalį sudaro jo kinetinė, ir kurią – potencinė energija. $\left(\frac{2}{3} \text{ ir } \frac{1}{3}\right)$

5. Nusileidęs slidėmis nuo kalno, žmogus horizontaliu kelio ruožu dar nušliuožė 100 m. Žmogaus masė 100 kg, trinties tarp slidžių ir sniego koeficientas lygus 0,02. Apskaičiuokite:

a) trinties jėgos atliktą darbą; (–2000 J)

b) žmogaus kinetinę energiją kalno papėdėje; (2000 J)

c) kalno aukštį. (2 m)

6. Akmuo, kurio masė 0,4 kg, metamas vertikaliai aukštyn 20 m/s greičiu. Apskaičiuokite akmens kinetinę ir potencinę energiją 15 m aukštyje. Oro pasipriešinimo nepaisykite. Tarkite, kad laisvojo kritimo pagreitis lygus 10 m/s^2. (E_k = 20 J, E_p = 60 J)

7. Akmuo išmestas 60° kampu į horizontą. Pradiniu momentu jis įgijo 20 J kinetinės energijos. Apskaičiuokite akmens kinetinę ir potencinę energiją aukščiausiame jo trajektorijos taške. Į oro pasipriešinimą neatsižvelkite. (5 J; 15 J)

8. Važiuodamas greitaeigiu traukiniu, kurio greitis 580 km/h, studentas mokosi anglų kalbos žodžių. Ant kelių jis laiko žodyną, sveriantį 2 kg. Apskaičiuokite žodyno kinetinę energiją:

a) studento atžvilgiu; (0 J)

b) keleivio, sėdinčio tame pačiame vagone, atžvilgiu; (0 J)

c) keleivio, kuris sėdi kitame greitaeigiame traukinyje, važiuojančiame priešinga kryptimi tokiu pat greičiu, atžvilgiu. (103,7 kJ)

9. Du masės m_1 ir m_2 rutuliai juda vienas priešais kitą greičiais v_1 ir v_2. Apskaičiuokite rutulių sistemos kinetinės energijos pokytį po visiškai netampraus centrinio smūgio. $\left(\frac{m_1 m_2 (v_1 + v_2)^2}{2(m_1 + m_2)}\right)$

7.8. Naudingumo koeficientas

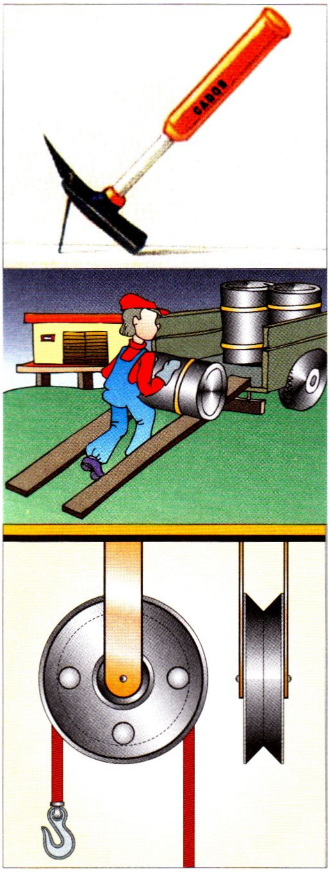
Pagrindinės sąvokos

Naudingùmo koeficieñtas.

Energijos virsmai vyksta mašinose bei įrenginiuose, kuriuos žmonės praktinėms reikmėms naudoja jau daugiau kaip du šimtus metų. Jiems veikiant, vienos rūšies energija virsta kitos rūšies energija.

Mašinose ir įrenginiuose ne tik vyksta energijos virsmai. Dėl trinties jėgų darbo įšyla mašinų detalės ir dalis energijos prarandama – virsta vidine energija, kuri sudaro nuostolius. Įvairiuose įrenginiuose jie gali būti nevienodi. Kuo mažesni nuostoliai, tuo tobulesnė mašina ar įrenginys. Fizikinis dydis, rodantis, kaip efektyviai mašina naudoja jai teikiamą energiją, vadinamas ***naudingùmo koeficientù*** ir žymimas raide η. Kokia yra fizikinė jo prasmė? Norint atsakyti, reikia žinoti, kas yra mašinos ar įrenginio naudingasis ir kas – visas darbas.

Naudodama energiją, mašina atlieka darbą. Tas darbas, kuriam atlikti sukurta ir naudojama mašina,



7.8.1 pav.

vadinamas ***naudìnguoju*** (A_n). Pavyzdžiui, darbas, kurį atlieka ekskavatorius, iškeldamas iš duobės žemę, yra naudingasis jo darbas. Tačiau jis – tik dalis viso ekskavatoriaus atliekamo darbo. Šis iš tiesų yra didesnis. Juk darbas atliekamas ne tik iškeliant žemę, bet ir periodiškai kilnojant bei nuleidžiant kaušą, sukiojant ekskavatoriaus kabiną, įveikiant trintį tarp detalių. Mašinos ar įrenginio darbas apskritai vadinamas ***visù dárbu*** (A_v).

Fizikinis dydis, lygus naudingojo ir viso atlikto darbo santykiui, vadinamas naudingùmo koeficientù:

$$\eta = \frac{A_n}{A_v} \cdot 100\,\%. \qquad (7.38)$$

Kuo mažesni energijos nuostoliai patiriami mašinoje, tuo didesnis jos naudingumo koeficientas. Tačiau jokios mašinos naudingumo koeficientas negali būti didesnis už 100 %, arba už vienetą.

Tūkstantmečiais žmogui talkino tokie paprastieji mechanizmai: svertas, nuožulnioji plokštuma, skridinys (7.8.1 pav.). Nuožulniosios plokštumos principu rėmėsi dar Egìpto piramidžių statytojai. Statant Cheòpso piramidę, 2,5 t masės akmens luitai buvo keliami į 147 m aukštį. Mokydamiesi mechanikos pradmenų, įsitikinote, kad nė vienu paprastuoju mechanizmu negalima laimėti darbo, taigi naudingasis jų darbas yra mažesnis už visą darbą ($A_n < A_v$). Paprastieji mechanizmai tik palengvina žmogaus darbą,

Kai kurių paprastųjų mechanizmų naudingumo koeficientai

Mechanizmo pavadinimas	Naudingumo koeficientas, %	Mechanizmo pavadinimas	Naudingumo koeficientas, %
Skridinys (kilnojamasis arba nekilnojamasis)	94–98	Rankinis suktuvas (viena krumpliaračių pora)	80
Skrysčiai, sudaryti iš:		Sraigtinis kėliklis	30–40
• 4 skridinių,	91	Stiebinis svertinis (automobilių) kėliklis	95–97
• 6 skridinių,	86		
• 8 skridinių,	82	Hidraulinis kėliklis	75–80
• 10 skridinių	78	Hidraulinis presas	80–90
Pleištas[1]	10–30	Svertas	99

[1] Siauresnio pleišto, kuriuo laimima daugiau jėgos, naudingumo koeficientas yra mažesnis.

keisdami veikiančias jėgas. Lentelėje pateikiame kai kurių paprastųjų mechanizmų ir prietaisų naudingumo koeficientų vertes.

Daugelį šimtmečių buvo bandoma kurti mašinas, kurios galėtų atlikti didesnį darbą, negu sunaudoja energijos. Tokios mašinos vadinamos ***amžinaĩsiais varìkliais***. Amžinojo variklio naudingumo koeficientas turėtų būti didesnis už vienetą arba bent jau jam lygus. Tačiau tai prieštarautų energijos tvermės dėsniui. Tik XIX a. viduryje, atradus energijos tvermės dėsnį, tapo aišku, kad amžinojo variklio sukurti neįmanoma.

Energijos virsmai žmogaus organizme

7.8.2 pav.

Žmogaus organizmas cheminę maisto produktų (7.8.2 pav.) energiją paverčia šilumine bei mechanine (judėjimo) energija. Gyvybiniams procesams palaikyti ir mechaniniam darbui atlikti reikalingą energiją jis gauna taip. Augalai sugeria Saulės energiją ir kaupia ją cheminiuose junginiuose. Misdami augalais, gyvūnai pagamina dar sudėtingesnių medžiagų, kurios su augaliniu bei gyvuliniu maistu patenka į žmogaus virškinimo sistemą. Čia maistas suskaidomas į cheminių junginių komponentus, o šie naudojami kaip kūno audinių ir cheminių junginių, reikalingų pagrindiniams gyvybiniams procesams, statybinės medžiagos. Tas medžiagas ir jų kitimus tiria biochemija.

Kai kurių maisto produktų energinė vertė

Produkto pavadinimas	Energijos kiekis, $\times 10^6$ J	Produkto pavadinimas	Energijos kiekis, $\times 10^6$ J
Šokoladas	2,10	Aliejus	3,77
Cukrus	1,70	Sodos vanduo	0,29
Duona	1,10	Bulvės	0,38
Ryžiai	1,47	Burokėliai	0,20
Kumpis	1,38	Kriaušės	0,27
Žuvis	0,42	Vynuogės	0,31
Sviestas	3,14	Uogienė	1,25

Įvairūs maisto produktai išskiria nevienodą kiekį energijos. Lentelėje (žr. p. 43) nurodyta, kiek jos gaunama iš 100 g dažniausiai vartojamų maisto produktų.

Žmogaus organizmui nuolat reikalinga energija. Net ir ilsėdamasis jis eikvoja energiją, kuri palaiko širdies, krūtinės raumenų darbą. Antra vertus, dalis maisto produktų cheminės energijos naudojama pastoviai žmogaus kūno temperatūrai palaikyti. Kadangi ji yra aukštesnė už aplinkos temperatūrą, tai žmogaus kūnas nuolat šildo aplinką, atiduodamas jai dalį maisto produktų energijos. Energija taip pat reikalinga ląstelių gyvybinėms funkcijoms palaikyti.

Žmogaus organizmui per parą reikia vidutiniškai 3000 kcal energijos (1 cal = 4,18 J). Jos poreikis priklauso nuo žmogaus gyvenimo būdo, fizinio aktyvumo. Neaktyviam žmogui per parą pakanka apie 2000 kcal energijos, o dirbančiam sunkų fizinį darbą jos reikia daugiau – apytiksliai 4000 kcal.

Tik 25 % maisto produktų energijos žmogaus organizmas paverčia mechaniniu darbu, visa kita jos dalis skiriama gyvybinėms funkcijoms palaikyti. Jeigu žmogų vertintume kaip mechaninį įrenginį, jo naudingumo koeficientas būtų palyginti mažas – siektų vos 25 %.

Klausimai ir užduotys ??

1. Paaiškinkite, kaip suprantate vandens siurblio naudingąjį darbą ir visą darbą.

2. Pasiūlykite, kaip būtų galima padidinti konkretaus mechanizmo naudingumo koeficientą.

3. Apskaičiuokite 2 m ilgio ir 0,6 m aukščio nuožulniosios plokštumos naudingumo koeficientą. Trinties koeficientas kūnui judant lygus 0,1. (44 %)

4. Nuožulniąja plokštuma, kurios nuolydžio kampas 30°, į 2 m aukštį tempiamas 400 kg masės krovinys. Trinties tarp nuožulniosios plokštumos ir krovinio koeficientas lygus 0,3.

a) Nubraižykite aiškinamąjį brėžinį.

b) Apskaičiuokite darbą, kurį reikia atlikti užtempiant krovinį. (12 kJ)

c) Apskaičiuokite nuožulniosios plokštumos naudingumo koeficientą. (66 %)

7.9. Vėjo energija ir jos naudojimas

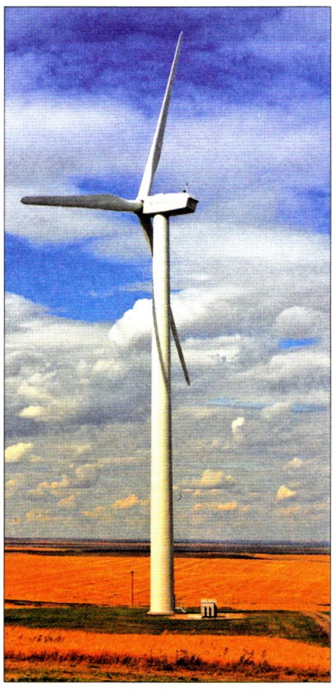
Energijos ištekliai, kuriais šiandien naudojasi žmogus, formavosi milijonus metų. Anglys, nafta ir gamtinės dujos, t. y. iškastinis kuras, sukaupė Saulės energiją, pasiekusią Žemę, galbūt prieš 500 milijonų metų. Jis susidarė iš augalų.

Beveik pusę pasaulio energijos šiuo metu teikia nafta, o penktadalį – gamtinės dujos. Kartu jos sudaro apie 67 % visos suvartojamos energijos. Apskaičiuota, kad žemėje glūdi apie 600 000 milijonų tonų anglių. Palyginti su paklausa, naftos ištekliai daug mažesni nei anglių. Jų yra maždaug 90 000 milijonų tonų. Per metus pasaulyje suvartojama apie 3000 milijonų tonų naftos. Jei žmonija ir ateityje ją eikvos taip sparčiai ir nebus atrasta naujų šaltinių, tai jau XXI a. viduryje naftos galime pristigti. Mažėjant naftos, anglių ir kitiems neatsinaujinantiems energijos ištekliams, ieškoma naujų energijos šaltinių.

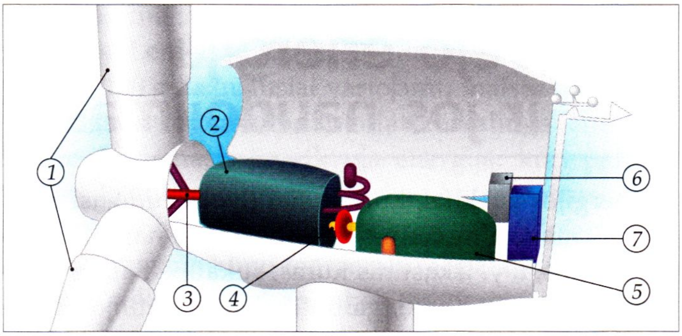
7.9.1 pav.

Istorija byloja, kad pirmiausia žmonės ėmė naudoti vandens ir vėjo (t. y. judančių oro srautų) energiją. 3500 m. pr. Kr. babiloniečiai kinetinę vėjo energiją pradėjo naudoti laukams drėkinti, taip pat laivyboje. Europoje ja susidomėta vėliau. Vėjo malūnai čia pradėti statyti tik viduramžiais, Lietuvojè – dar vėliau, XVIII a., Šiaulių̃, Naũmiesčio, Vilkavìškio apskrityse. XIX a. antrojoje pusėje Lietuvojè veikė apie 200, o 1921 m. – jau apie 1000 vėjo malūnų (7.9.1 pav.). Daugiausia jų pastatyta Vìdurio Lietuvojè ir Ùžnemunėje, nes čia stipriausi vėjai.

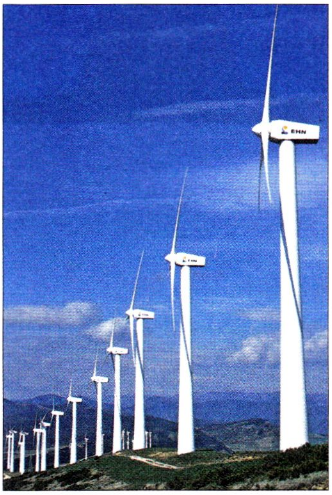
7.9.2 pav.



Kinetinė vėjo energija dabar naudojama kitiems tikslams – elektros energijai gaminti. Daugelyje Europos šalių pastatytos vėjo jėgainės (7.9.2 pav.), kuriose kinetinė vėjo energija virsta elektros energija. Gaunamos energijos kiekis priklauso nuo oro tankio, sparnų ploto, o ypač nuo vėjo greičio. Šiuo metu smarkiai plečiasi vėjo parkai (7.9.4 pav.). Geriausios vietos jiems įrengti yra pajūrio vietovės ant kalvų viršūnių, taip pat atviri laukai ir kalnų tarpekliai, kur vėjas stiprus ir pastovus.



7.9.3 pav.



7.9.4 pav.

7.9.3 paveiksle pavaizduota vėjo variklio schema. Jį sudaro mentės *1*, greičių dėžė *2*, ašis *3*, hidraulinė sistema *4*, generatorius *5*, elektrinis valdiklis *6*, aušinimo sistema *7*. Šiuolaikiniai vėjo varikliai turi įtaisus, kurie, keičiantis vėjo krypčiai, automatiškai pasuka darbo ratą.

Vėjo jėgainės turi daug privalumų. Vienas iš jų – ekonominis: už vėjo energiją nereikia mokėti, kitas – ekologinis: jėgainės neteršia aplinkos. Tuo nesunku įsitikinti palyginus vėjo jėgainių (7.9.4 pav.) ir šiluminių elektrinių (7.9.5 pav.) aplinką. Vėjo jėgainės nesudaro prielaidų šiltnamio reiškiniui vykti.

Vėjo jėgainių galia Europos šalyse nuolat didėja. Lentelėje pateikti duomenys rodo, kaip pakito vėjo jėgainių galia 1997–2001 metais.

Šalis	Vėjo jėgainių galia, MW	
	1997 m.	2001 m.
Vokietijà	2002	3202
Dãnija	1135	1685
Ispãnija	449	1449
Ánglija	333	378

7.9.5 pav.

2003 m. duomenimis, vėjo jėgainių skaičius kai kuriose Vakarų Europos šalyse buvo toks: Vokietìjoje – 14 609, Dãnijoje – 3110, Didžiõjoje Britãnijoje – 904, Lénkijoje – 57, Lãtvijoje – 24, Èstijoje – 3.

Lietuvojè pirmoji vėjo jėgainė pastatyta 1991 m. Príenuose. Ji buvo skirta individualiems poreikiams.

Pirmoji pramoninė vėjo jėgainė suprojektuota 2002 m. netoli Skuõdo (7.9.6 pav.). Ji turi tris sparnus, kurių vieno ilgis yra 10,5 m. Sparnai sukasi negreitai – 40 sūk/min dažniu. Jėgainė turi du skirtingos galios generatorius. Per 1 h ji pagamina apie 160 kW energijos. 2002 m. spalio 2 d. Prienuose įsteigta Vėjo energetikų asociacija (2003 m. vasario 10 d. ji priimta į Pasaulio vėjo energetikų asociaciją). Vėjo jėgainių tinklą Lietuvojè numatoma plėsti. Manoma, kad 2010 m. vėjo jėgainės pagamins 7 % visos elektros energijos.

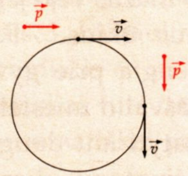
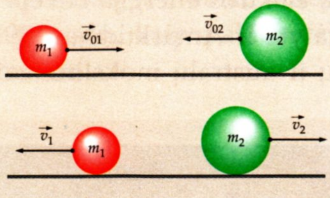
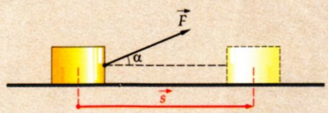
7.9.6 pav.

Tiek užsienio šalyse, tiek Lietuvojè gyventojai stato mažas vėjo jėgaines, kurios aprūpina elektra privačius ūkius. 7.9.7 paveiksle matome tokią jėgainę, įrengtą prie gyvenamojo namo. Vėjo jėgainę vienas Pãsvalio miestelio gyventojas 2004 m. įsigudrino pastatyti ant daugiabučio namo stogo. Jos galia 3 kW. Vėjuotomis dienomis jėgainės energija kaupiama keturiuose akumuliatoriuose. Sukauptą energiją buto šeimininkas naudoja nevėjuotomis dienomis. Už jėgainės pagamintą energiją jam mokėti nereikia.

Vėjo jėgainės statomos daugelyje pasaulio šalių: JAV, Japònijoje, Dãnijoje, Vokietìjoje, Olándijoje ir kt. Namìbijoje įrengta 10 MW galios vėjo jėgainė aprūpina elektros energija beveik visą šalį. Vėjo jėgainė pastatyta ir Antarktìdoje. 1993 m. ją ten įrengė prancūzų ir australų mokslininkai.

7.9.7 pav.

Skyriaus „Tvermės dėsniai mechanikoje" apibendrinimas

Jėgos impulsas	Jėgos impulsas lygus kūną veikiančios jėgos $\vec{F}$ ir jos veikimo trukmės Δt sandaugai. Jėgos impulso kryptis sutampa su kūną veikiančios jėgos kryptimi.
Judesio kiekis	Judesio kiekis lygus kūno masės ir greičio sandaugai: $\vec{p} = m\vec{v}$; $[p] = 1\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$. Kūno judesio kiekio kryptis sutampa su to kūno greičio kryptimi. 
Jėgos impulso ir judesio kiekio ryšys	Kūno judesio kiekio pokytis lygus jėgos impulsui: $\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$.
Judesio kiekio tvermės dėsnis	Uždarosios sistemos kūnų judesio kiekių geometrinė suma yra pastovi, kai tos sistemos kūnai bet kaip sąveikauja vienas su kitu: $m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$. 
Mechaninis darbas	Darbas, kurį atlieka pastovi jėga, lygus jėgos ir poslinkio vektorių modulių sandaugai, padaugintai iš kampo tarp tų vektorių kosinuso: $A = Fs \cos \alpha$.  Pagrindinis mechaninio darbo matavimo vienetas yra džaulis: $[A] = 1\ \text{J} = 1\ \text{N} \cdot \text{m}$. Mechaninis darbas taip pat gali būti matuojamas vatsekundėmis, kilovatvalandėmis, megavatvalandėmis: $1\ \text{Ws} = 1\ \text{J}$, $1\ \text{kWh} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}$, $1\ \text{MWh} = 3{,}6 \cdot 10^9\ \text{J}$.

Mechaninė galia	Mechaninė galia yra fizikinis dydis, lygus atlikto darbo ir laiko, per kurį tas darbas atliktas, santykiui: $$N = \frac{A}{t}.$$ Galia matuojama vatais: $[N] = 1\ \text{W} = 1\ \text{J/s}$.
Kinetinė energija	Fizikinis dydis, lygus kūno masės ir greičio kvadrato sandaugos pusei, vadinamas kinetine energija: $$E_k = \frac{mv^2}{2};$$ $$[E_k] = 1\ \text{J}.$$
Potencinė energija	Energija, kurios turi pakeltas kūnas dėl sąveikos su kitais kūnais arba deformuotas kūnas dėl atskirų jo dalių tarpusavio sąveikos, vadinama potencine energija. Kūno, pakelto į aukštį h virš Žemės paviršiaus, potencinė energija $$E_p = mgh.$$ Tampriai deformuoto kūno potencinė energija $$E_p = \frac{kx^2}{2};$$ $$[E_p] = 1\ \text{J}.$$
Sunkio darbas	Sunkio darbas lygus kūno potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu: $$A = -(mgh_2 - mgh_1).$$ Sunkio darbas nepriklauso nuo kūno judėjimo trajektorijos. Kai ji uždara, darbas lygus nuliui.
Tamprumo jėgos darbas	Tamprumo jėgos darbas lygus tampriai deformuoto kūno potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu: $$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right).$$ Tamprumo jėgos darbas nepriklauso nuo kūno judėjimo trajektorijos. Kai ji uždara, darbas lygus nuliui.
Pilnutinės mechaninės energijos tvermės dėsnis	Uždarosios sistemos kūnų, veikiančių vienas kitą gravitacijos ir tamprumo jėgomis, pilnutinė mechaninė energija nekinta: $$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}.$$
Naudingumo koeficientas	Naudingumo koeficientu vadinamas dydis, lygus naudingojo ir viso atlikto darbo santykiui: $$\eta = \frac{A_n}{A_v} \cdot 100\ \%.$$

Mechanika

8 Mechaniniai svyravimai ir bangos

Be nagrinėto kūnų slenkamojo judėjimo ir sukimosi, gamtoje yra dar vienos rūšies judėjimas – mechaninis svyravimas. Svyruoja jūros paviršius, skambanti gitaros styga, vidaus degimo variklio stūmoklis, laikrodžio svyruoklė, medžių lapai, šakos vėjyje. Šiame skyriuje sužinosite, kokie fizikiniai dydžiai apibūdina mechaninį svyravimą, kaip nustatyti svyruojančio kūno padėtį bet kuriuo laiko momentu.

8.1. Mechaninis svyravimas ir jo rūšys. Laisvojo svyravimo sąlygos

Pagrindinės sąvokos

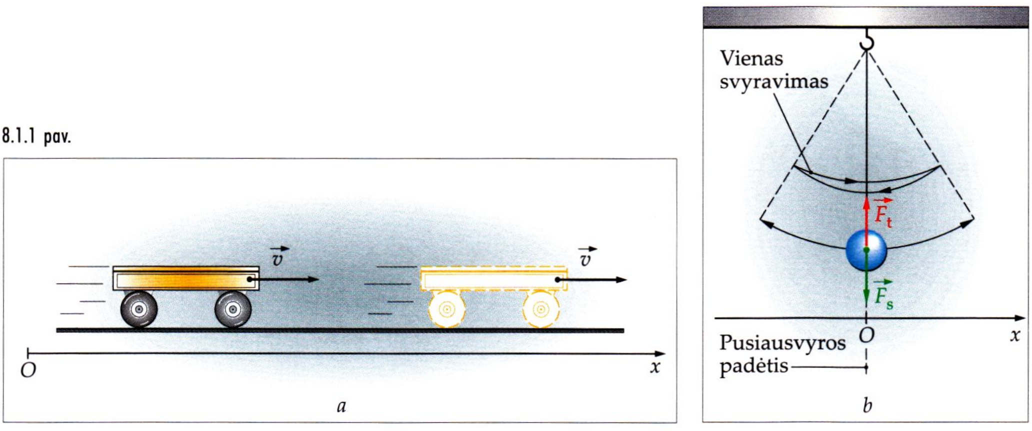
Mechãninis svyrãvimas, periòdinis judesỹs, pusiáusvyros padėtìs, vidìnės jẽgos, išorìnės jẽgos, laisvàsis svyrãvimas, priverstìnis svyrãvimas, matemãtinė svyruõklė.

Mechaninio svyravimo samprata

Norėdami atskleisti mechaninio judėjimo dėsningumus, palyginkime kūno tiesiaeigį judėjimą ir svyravimą. Stebint stalo paviršiumi tiesiai judantį vežimėlį ir ant siūlo svyruojantį rutuliuką (8.1.1 pav., *a* ir *b*), nesunku nustatyti, kuo skiriasi šie du mechaniniai judesiai. Vežimėlis kiekvienu laiko momentu užima vis kitą padėtį, ir ji laikui bėgant nesikartoja. O svyruojančio rutuliuko padėtis erdvėje nuolat kartojasi. Susvyravęs vieną kartą, t. y. nuskriejęs nuo dešiniosios kraštinės iki kairiosios kraštinės padėties ir atgal, rutuliukas kartoja tą patį judesį. Tiksliai pasikartojantis judesys vadinamas ***periòdiniu jùdesiu***. Vadinasi, išskirtinis mechaninio svyravimo požymis yra judėjimo periodiškumas. Svyruojančio kūno padėtis nuolat kartojasi pusiausvyros padėties atžvilgiu. Padėtis, kurioje kūną veikiančių jėgų suma lygi nuliui, vadinama ***pusiáusvyros padėtimì***.

Mechãniniu svyrãvimu vadiname laikui bėgant periodiškai pasikartojantį kūno judėjimą ta pačia trajektorija pusiausvyros padėties atžvilgiu.

8.1.1 pav.



Tarpusavy susiję kūnai sudaro sistemas. Pavyzdžiui, kūnų sistemą sudaro siūlas ir ant jo pakabintas rutuliukas, sūpuoklės ir jose sėdintis vaikas. Jėgos, veikiančios tik tarp sistemos kūnų, vadinamos ***vidìnėmis jėgomìs***, o jėgos, kuriomis sistemos kūnus veikia kiti kūnai, nepriklausantys tai sistemai, – ***išorìnėmis jėgomìs***. Atsižvelgiant į jėgų poveikį kūnų sistemai, svyravimas gali būti laisvasis ir priverstinis.

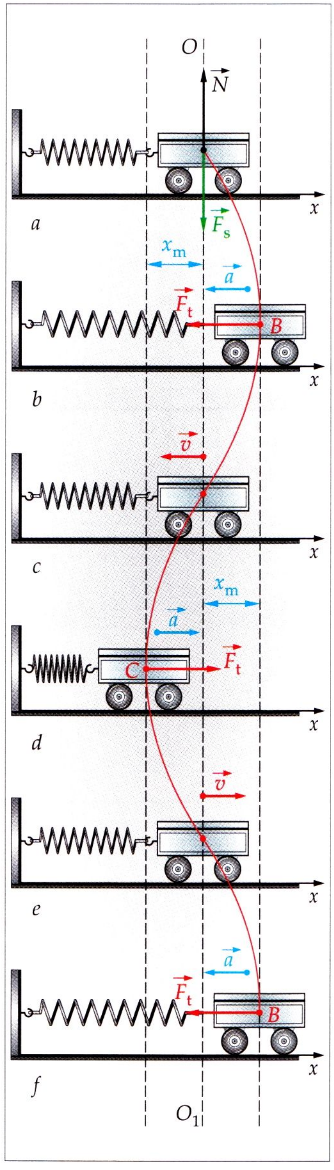
- ***Laisvúoju*** vadinamas svyravimas, kurį sukelia sistemą veikiančios vidinės jėgos. Toks yra, pavyzdžiui, prie siūlo prikabinto rutuliuko svyravimas.
- ***Priverstiniù*** vadinamas svyravimas, kurį sukelia periodiškai kintanti išorinė jėga. Pavyzdžiui, stūmoklio variklio cilindre, siuvamosios mašinos adatos, drožimo staklių peilio, boksininko smūgiuojamos kriaušės svyravimas yra priverstinis.

Laisvojo svyravimo sąlygos

Išsiaiškinkime, kokiomis sąlygomis atsiranda laisvasis mechaninis svyravimas. Išnagrinėkime dvi kūnų sistemas: ant siūlo pakabintą rutuliuką ir prie spyruoklės pritvirtintą vežimėlį.

Pirma aptarkime, kaip ir kodėl svyruoja prie plieninės spyruoklės prikabintas vežimėlis – spyruoklinė svyruoklė. Vienas spyruoklės galas pritvirtinamas prie stovo, o prie kito galo pritaisomas vežimėlis (8.1.2 pav., *a*). Kai spyruoklė yra nedeformuota (padėtis OO_1), tamprumo jėga $\vec{F}_t$ vežimėlio neveikia. Sunkio $\vec{F}_s$ ir atramos reakcijos jėga $\vec{N}$ viena kitą kompensuoja. Vadinasi, vežimėlį veikiančių jėgų atstojamoji lygi nuliui. Ši vežimėlio padėtis yra jo pusiausvyros padėtis OO_1. Patraukus vežimėlį į dešinę (8.1.2 pav., *b*), spyruoklė išsitempia, todėl atsiranda tamprumo jėga $\vec{F}_t$, kuri stengiasi grąžinti ją į pusiausvyros padėtį. Paleistas vežimėlis, veikiamas jėgos $\vec{F}_t$, juda greitėdamas pusiausvyros padėties link ir, ją pasiekęs, įgyja didžiausią greitį (8.1.2 pav., *c*). Šioje padėtyje vežimėlio neveikia tamprumo jėga, nes spyruoklė yra nedeformuota, taigi jo pagreitis čia lygus nuliui. Vis dėlto padėtyje OO_1 vežimėlis nesustoja, bet iš inercijos juda toliau, taško C link (8.1.2 pav., *d*). Dabar jis spyruoklę ima spausti. Atsiranda tamprumo jėga $\vec{F}_t$, trukdanti vežimėliui judėti. Ji suteikia jam

8.1.2 pav.

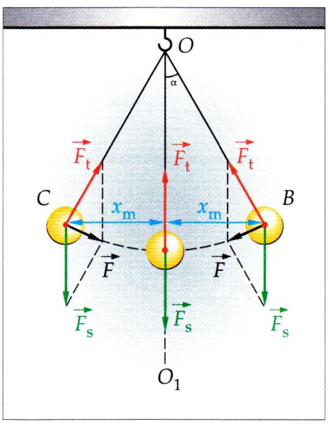


pagreitį $\vec{a}$, kurio kryptis yra priešinga greičio krypčiai. Vežimėlis rieda lėtėdamas ir, pasiekęs tašką C, sustoja. Šioje padėtyje vežimėlį veikia tamprumo jėga $\vec{F}_t$, nukreipta į pusiausvyros padėtį. Ji verčia vežimėlį judėti greitėjančiai į dešinę. Iš inercijos jis vėl pereina pusiausvyros padėtį (8.1.2 pav., *e*) ir grįžta į pradinę padėtį (tašką B; 8.1.2 pav., *f*), susvyravęs vieną kartą. Vėliau vežimėlio svyravimas kartojasi.

Dabar jau galime atsakyti į klausimą, kodėl svyruoja prie spyruoklės pritvirtintas vežimėlis. Šio svyravimo priežastis – kintama jėga, veikianti vežimėlį pusiausvyros padėties kryptimi ir grąžinanti jį į tą padėtį. Jei vežimėlis pusiausvyros padėtyje sustotų, svyravimas nutrūktų. Vadinasi, prie spyruoklės pritvirtinto kūno svyravimo priežastis yra tamprumo jėga, veikianti kūną pusiausvyros kryptimi, ir kūno inercija.

Tokios rūšies svyravimas, su kuriuo susipažinome nagrinėdami spyruoklinės svyruoklės pavyzdį, yra labai paplitęs. Taip svyruoja mašinų dalys, statybinės sijos, lingės, veikiamos apkrovų. Prie šių svyravimų priskiriami ir garso virpesiai.

8.1.3 pav.



Dabar aptarkime kitos kūnų sistemos – ant siūlo pakabinto rutuliuko – svyravimą (8.1.3 pav.). Jei rutuliuko matmenys yra daug mažesni už siūlo ilgį, tai į juos galime neatsižvelgti ir rutuliuką prilyginti materialiajam taškui. Taip pat nepaisome siūlo pailgėjimo ir masės, nes jie labai maži. Taigi realią svyruoklę pakeičiame jos modeliu – matematine svyruokle. ***Matemãtine svyruoklè*** vadinama sistema, sudaryta iš mažo kūno, pakabinto ant ilgo netįsaus siūlo, kurio masė labai maža, palyginti su kūno mase.

Kai svyruoklė yra pusiausvira (padėtis OO_1), rutuliuką veikiantį sunkį $\vec{F}_s$ kompensuoja siūlo tamprumo jėga $\vec{F}_t$. Rutuliuką patraukus į dešinę nuo pusiausvyros padėties (perkėlus į tašką B), jį veikiančios jėgos sudaro tarpusavyje bukąjį kampą ir nebekompensuoja viena kitos. Atsiranda jų atstojamoji $\vec{F}$, nukreipta į pusiausvyros padėtį. Svyruoklei artėjant prie pusiausvyros padėties, atstojamosios modulis mažėja ir padėtyje OO_1 virsta nuliu. Tačiau svyruoklė šioje padėtyje nesustoja, o iš inercijos nukrypsta į kairę. Dabar jėga $\vec{F}$ ima ją veikti priešinga kryptimi, tačiau pusiausvyros padėties link, be to, didėjant svyruoklės nuokrypiui, ji taip pat didėja. Svyruoklė juda lėtė-

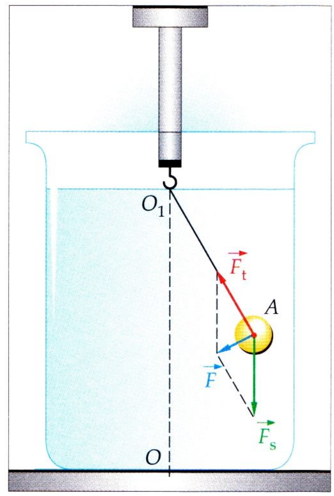
dama. Taške C ji stabteli, paskui greitėdama ima judėti į dešinę, iš inercijos pereina pusiausvyros padėtį OO_1 ir grįžta į pradinę padėtį (tašką B). Taip pasibaigia vienas svyravimo ciklas. Toliau viskas kartojasi iš naujo.

Matematinės svyruoklės svyravimo priežastis – rutuliuką veikiančių jėgų atstojamoji $\vec{F}$, nukreipta į kūno pusiausvyros padėtį ir grąžinanti rutuliuką į tą padėtį. Jei rutuliukas, kaip ir vežimėlis, pusiausvyros padėtyje sustotų, tai jis nebegalėtų toliau svyruoti. Taigi matematinės svyruoklės svyravimo priežastis yra jėgų atstojamoji, nukreipta į svyruoklės pusiausvyros padėtį, ir svyruoklės inercija.

Apibendrinkime išnagrinėtus laisvuosius svyravimus. Abiejose sistemose, išvedus kūną iš pusiausvyros padėties, atsiranda kintama jėga, veikianti pusiausvyros padėties kryptimi ir grąžinanti kūną į tą padėtį. Jėgos, nukreiptos į pusiausvyros padėtį, atsiradimas yra būtinoji, tačiau ne vienintelė laisvojo svyravimo sąlyga.

Laisvąjį svyravimą lemia sistemos trinties jėgos. Kad sistema galėtų svyruoti, trinties jėgos turi būti mažos. Pavyzdžiui, jei prie siūlo pritvirtintą rutuliuką panardinsime į klampų skystį (8.1.4 pav.), tai, veikiamas jėgų atstojamosios $\vec{F}$, rutuliukas iš taško A grįš į pusiausvyros padėtį. Dėl trinties jėgų darbo jo greitis šioje padėtyje bus lygus nuliui ir svyravimas užsibaigs. Didelė trinties jėga sustabdytų ir prie spyruoklės pritvirtinto kūno svyravimą. Vadinasi, kita laisvojo svyravimo sąlyga yra maža trintis sistemoje.

8.1.4 pav.



Mechaninį svyravimą apibūdinantys dydžiai

Tiesiaeigį kūno judėjimą apibūdina pagreitis, greitis ir poslinkis. Kūnui svyruojant, šie dydžiai nuolat kinta. Mokydamiesi mechanikos pradmenų, sužinojote, kad mechaninį svyravimą apibūdina kiti fizikiniai dydžiai. Prisiminkime juos.

- ***Svyrãvimo amplitudè*** x_m vadinamas didžiausias atstumas, kuriuo svyruojantis kūnas nutolsta nuo pusiausvyros padėties (8.1.2 pav., *b* ir *d*; 8.1.3 pav.). Pagrindinis svyravimo amplitudės matavimo vienetas yra *mètras*: $[x_m] = 1$ m.
- ***Savàsis svyrãvimo dãžnis*** ν – tai svyravimų skaičius per vieną sekundę. Jis matuojamas *hèrcais* (Hz).

Savasis svyravimo dažnis lygus 1 Hz, jei per 1 s kūnas susvyruoja vieną kartą:

$$[\nu] = 1\ \text{Hz} = 1\ \text{s}^{-1}.$$

Praktikoje vartojami ir kartotiniai dažnio matavimo vienetai – *kilohèrcas* (kHz), *megahèrcas* (MHz):

$$1\ \text{kHz} = 1000\ \text{Hz} = 10^3\ \text{Hz},$$

$$1\ \text{MHz} = 1\,000\,000\ \text{Hz} = 10^6\ \text{Hz}.$$

• ***Svyrãvimo periodù*** *T* vadinamas laiko tarpas, per kurį kūnas susvyruoja vieną kartą. Pavyzdžiui, prie spyruoklės pritvirtinto vežimėlio (8.1.2 pav.) svyravimo periodas yra laiko tarpas, per kurį vežimėlis iš taško *B* pasislenka į tašką *C* ir grįžta atgal į tašką *B*. Svyravimo periodas matuojamas *sekùndėmis*:

$$[T] = 1\ \text{s}.$$

Kai svyravimo periodas lygus 10 s, tai dažnis yra $\frac{1}{10}$ Hz. Dažnis – atvirkščias periodui dydis:

$$\nu = \frac{1}{T}. \qquad (8.1)$$

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname mechaniniu svyravimu; laisvuoju svyravimu; priverstiniu svyravimu? Pateikite pavyzdžių.

2. Kokiomis sąlygomis kūnas gali svyruoti?

3. Kas yra svyravimo periodas? Kaip jį galima apskaičiuoti?

4. Nustatykite prie spyruoklės pritvirtinto vežimėlio (8.1.2 pav.) judėjimo pobūdį, sudarydami tokią lentelę:

Vežimėlio judėjimas	Tamprumo jėgos didumas	Vežimėlio greitis	Vežimėlio pagreitis
Nuo taško *B* iki pusiausvyros padėties			
Nuo pusiausvyros padėties iki taško *C*			
Nuo taško *C* iki pusiausvyros padėties			
Nuo pusiausvyros padėties iki taško *B*			

5. Prie spyruoklės prikabintas vežimėlis per 8 s susvyruoja 32 kartus. Apskaičiuokite vežimėlio svyravimo periodą ir dažnį. (0,25 s; 4 Hz)

6. Važiuojant traukiniui, švaistiklio skriejiklio mechanizmo ratas per 6 min apsisuka 1440 kartų. Kokiu dažniu stūmoklis svyruoja garvežio cilindre? (4 Hz)

8.2. Svyravimo lygtis. Grafinis svyravimo vaizdavimas

Geometrinis svyravimo modelis. Harmoninis svyravimas

Pagrindinės sąvokos

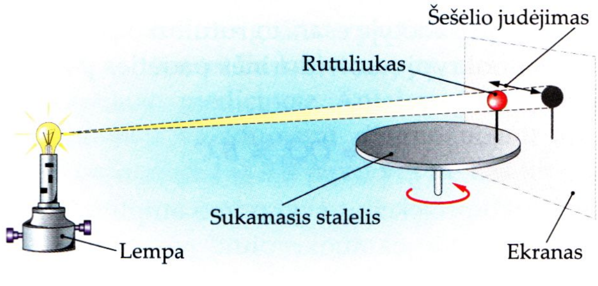
Harmòninis svyrãvimas.

Pagrindinis mechanikos uždavinys – nustatyti kūno padėtį bet kuriuo laiko momentu. Kai kūnas svyruoja, tai padaryti nelengva, nes kūną veikianti jėga nuolat kinta (8.1.2 ir 8.1.3 pav.). Taigi kaip nustatyti svyruojančio kūno padėtį bet kuriuo laiko momentu? Pasinaudokime mechaninio svyravimo ir judėjimo apskritimu panašumais.

Mechaninis svyravimas, kaip ir judėjimas apskritimu, yra periodinis judesys. Kūnų judėjimą apskritimu ir svyravimą apibūdina tie patys fizikiniai dydžiai: amplitudė, periodas, dažnis. Dėl to šiuos judesius galima susieti.

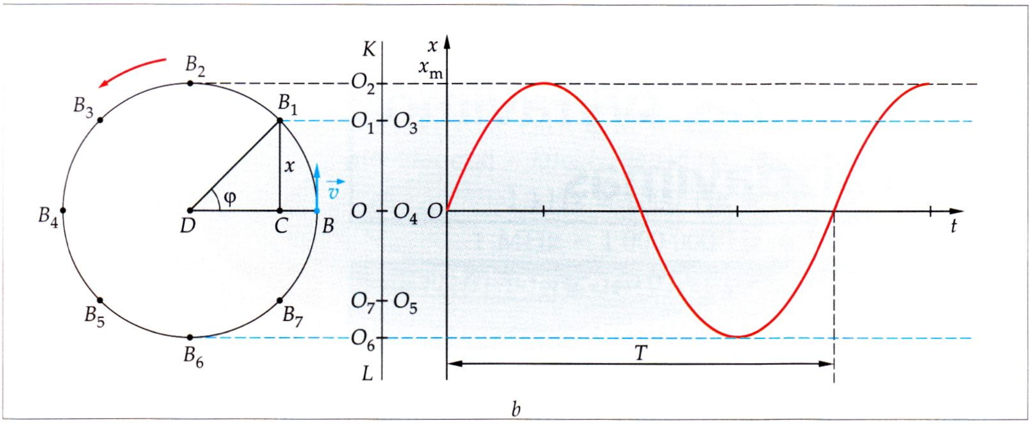
Nustatydami svyruojančio kūno koordinatę bet kuriuo laiko momentu, pasinaudosime geometriniu svyravimo modeliu. 8.2.1 paveiksle, *a*, pavaizduotas prie sukamojo stalelio krašto pritvirtintas rutuliukas. Jo šešėlis projektuojamas vertikaliame ekrane. Sukantis staleliui, rutuliukas juda apskritimu, o jo šešėlis (rutuliuko projekcija) ekrane – pirmyn ir atgal, panašiai kaip ant siūlo pakabintas rutuliukas.

8.2.1 paveiksle, *b*, raidėmis B, B_1, B_2 ir t. t. pažymėtos nedidelio rutuliuko, judančio tolygiai apskritimu,



a

8.2.1 pav.



8.2.1 pav.

padėtys įvairiais laiko momentais. Rutuliuko judėjimo negalime pavadinti svyravimu, nes jis visą laiką juda tik viena kryptimi, kuri yra priešinga laikrodžio rodyklės sukimosi krypčiai, o svyruojantis kūnas juda pirmyn ir atgal (8.1.2 ir 8.1.3 pav.).

Tirkime ne paties rutuliuko, bet jo projekcijos vertikalioje plokštumoje *KL* judėjimą. Iš 8.2.1 paveikslo, *b*, matyti, kad apskritimu judančio rutuliuko projekcija taško *O* atžvilgiu svyruoja pirmyn (O_1, O_2) ir atgal (O_5, O_6). Projekcijos greitis kinta taip pat kaip rutuliuko greitis. Kai rutuliukas yra padėtyje *B*, jo greitis $\vec{v}$ lygiagretus su plokštuma *KL*, o jo modulis lygus v. Tada rutuliuko greičio projekcija lygi v. Tai didžiausia jos vertė. Kai rutuliukas yra padėtyse B_2 ir B_6, greitis $\vec{v}$ statmenas plokštumai *KL*, todėl jo projekcija lygi nuliui. Taigi apskritimu judančio rutuliuko projekcija plokštumoje *KL* svyruoja apie vidurinę padėtį *O*. Nustatydami, kaip kinta apskritimu judančio kūno projekcijos koordinatė laikui bėgant, kartu sužinosime ir svyruojančio kūno koordinatės priklausomybę nuo laiko.

Bet kurioje padėtyje esančio rutuliuko projekcijos – šešėlio – nuokrypį nuo vidurinės padėties pažymėkime x:

$$x = OO_1 = B_1C.$$

Rutuliuko projekcijos svyravimo amplitudė x_m bus lygi didžiausiam jos nuokrypiui:

$$x_m = OO_2 = OO_6 = DB_2 = DB_6.$$

Iš trikampio DB_1C išplaukia, kad $B_1C = DB_1 \sin \varphi$. Pasirinkime koordinačių plokštumą xOt, kurios ašis Ox lygiagreti su plokštuma KL. Plokštumoje xOt taškais pažymėkime rutuliuko projekcijos padėtį skirtingais laiko momentais. Iš brėžinio matyti, kad rutuliuko projekcijos koordinatę x, o kartu ir svyruojančio kūno koordinatę galima išreikšti taip:

$$x = x_m \sin \varphi; \quad (8.2)$$

čia φ yra kampas, kuriuo rutuliukas pasisuka per laiką t, praėjusį nuo to momento, kai išėjo iš pradinės padėties. Išreikškime šį kampą rutuliuko kampiniu greičiu ω:

$$\varphi = \omega t = \frac{2\pi}{T} t. \quad (8.3)$$

Gautą išraišką įrašę į (8.2) formulę, gauname lygtį, pagal kurią galima nustatyti svyruojančio kūno padėtį bet kuriuo laiko momentu:

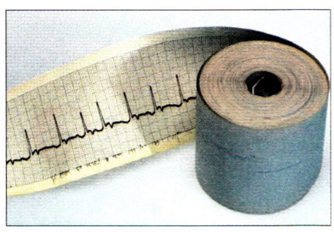
$$x = x_m \sin \varphi = x_m \sin(\omega t) = x_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right). \quad (8.4)$$

Taigi svyruojančio kūno koordinatė kinta pagal sinuso dėsnį. ***Nuo laiko priklausantis fizikinio dydžio periodiškas kitimas pagal sinuso arba kosinuso dėsnį vadinamas harmòniniu svyrãvimu.*** Jis vaizduojamas sinuso arba kosinuso grafiku (sinusoide arba kosinusoide), kurį mokėtės braižyti per matematikos pamokas.

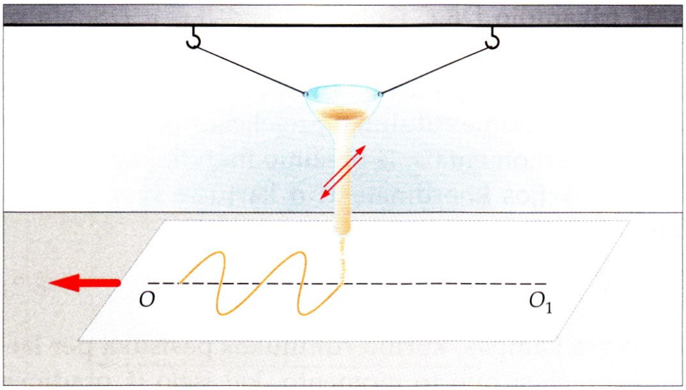
Grafinis svyravimo vaizdavimas

Šis metodas taikomas daugelyje praktinės veiklos sričių. Svyravimą vaizduoti grafiškai naudinga tada, kai reikia tirti atskiras greitai vykstančių procesų stadijas. Jis labai praverčia konstruojant mašinas, statybose, akustikoje, medicinoje. Antai medicinoje svyravimai grafiškai vaizduojami diagnozuojant širdies veiklą. Kardiograma (8.2.2 pav.) yra ne kas kita, kaip grafinis širdies pulsavimo (svyravimo) užrašas.

8.2.2 pav.



Svyravimą nesunku pavaizduoti grafiškai atliekant tokį bandymą. Piltuvėlis virvelėmis pritvirtinamas prie atramos, pripilamas smėlio ir paleidžiamas



8.2.3 pav.

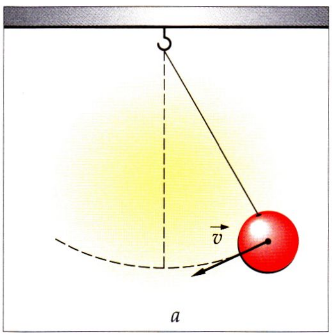
svyruoti (8.2.3 pav.). Po piltuvėliu padedamas popieriaus lapas, o jame per vidurį nubrėžiama „nulinė“ tiesė OO_1. Piltuvėliui svyruojant, iš jo byrantis smėlis žymi svyruoklės padėtį skirtingais laiko momentais. Kai popieriaus lapas nejuda, smėlis jame nuberia tiesų takelį, kuris yra statmenas tiesei OO_1. Popieriaus lapą traukiant tolygiai į kairę, smėlio takelis kerta tiesę OO_1 vienodais laiko tarpais, lygiais pusei periodo. Šiuo atveju smėlinis svyruoklės judėjimo grafikas yra sinusoidė. Vadinasi, svyruoklės svyravimas yra harmoninis. Atstumas nuo bet kurio smėlio takelio taško iki tiesės OO_1 lygus svyruoklės nuokrypiui x tuo momentu. Didžiausias nuokrypis vaizduoja svyravimo amplitudę x_m.

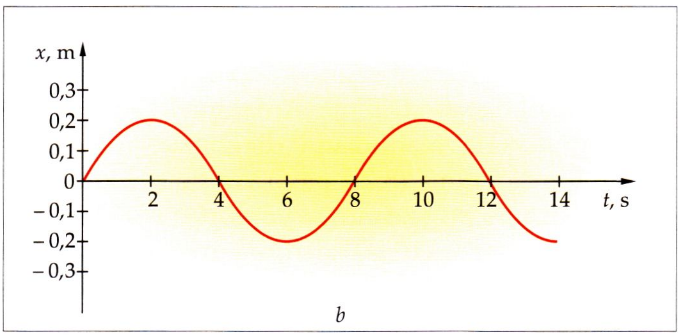
Klausimai ir užduotys

1. Kaip sprendžiamas pagrindinis mechanikos uždavinys, kai kūnas laisvai svyruoja?

2. Kas bendra kūno judėjimui apskritimu ir mechaniniam svyravimui?

8.2.4 pav.





3. Koks svyravimas vadinamas harmoniniu?

4. Svyruojančio kūno judėjimo lygtis yra tokia: $x = 0{,}03 \cdot \cos(100\pi t)$; čia x matuojamas centimetrais, o t – sekundėmis. Remdamiesi lygtimi, atlikite šias užduotis:
a) nubraižykite priklausomybės $x = x(t)$ grafiką;
b) nustatykite kūno padėtį po 0,01 s; (–0,03 cm)
c) apskaičiuokite kūno poslinkį po 0,1 s; po 0,2 s. (0,03 cm; 0)

5. Svyravimo amplitudė 20 cm, o dažnis 0,25 Hz.
a) Parašykite priklausomybės $x = x(t)$ lygtį.
b) Nubraižykite priklausomybės $x = x(t)$ grafiką.

6. 8.2.4 paveiksle, *a*, pavaizduotas ant siūlo pakabinto rutuliuko svyravimas, o 8.2.4 paveiksle, *b*, nubraižytas šio svyravimo grafikas.
a) Nustatykite svyravimo amplitudę.
b) Raskite svyravimo periodą.
c) Apskaičiuokite svyravimo dažnį.
d) Nustatykite, kuriais laiko momentais svyruojančio kūno greitis buvo didžiausias; lygus nuliui.
e) Nurodykite, kada rutuliukas judėjo į dešinę, kada – į kairę.

8.3. Svyravimo fazė. Harmoningai svyruojančio kūno greitis ir pagreitis

Svyravimo fazės samprata

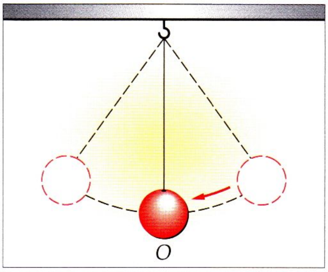
Pradėdami nagrinėti svyravimo fazę, dar kartą grįžkime prie harmoninio svyravimo funkcijos (8.4). Iš matematikos žinome, kad, kintant funkcijos argumentui, funkcijos reikšmė taip pat kinta. Harmoninio svyravimo funkcijos argumentas yra dydis

$$\varphi = \frac{2\pi}{T}t. \tag{8.5}$$

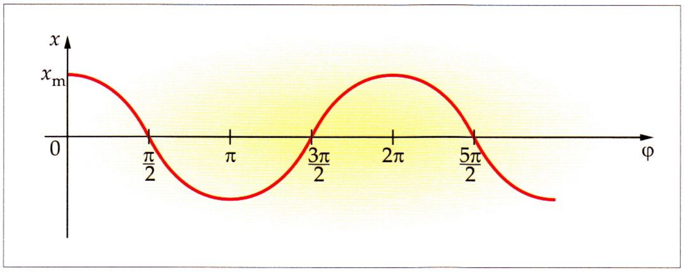
Nuo jo priklauso svyruojančio kūno padėtis (koordinatė) ir judėjimo kryptis konkrečiu laiko momentu. ***Fizikinis dydis, apibūdinantis svyruojančio kūno***

Pagrindinės sąvokos

Svyrãvimo fãzė,
harmoniñgai svyrúojančio kū̃no greĩtis,
harmoniñgai svyrúojančio kū̃no pãgreitis.



8.3.1 pav.



8.3.2 pav.

padėtį bet kuriuo laiko momentu, vadinamas svy-rãvimo fazè.

Harmoninio svyravimo funkcijos argumentą (8.5) galima užrašyti ir taip:

$$\varphi = 2\pi \frac{t}{T}. \tag{8.6}$$

Santykis $\frac{t}{T}$ rodo, kuri periodo dalis praėjo nuo svyravimo pradžios. Pavyzdžiui, kai iš dešiniosios kraštinės padėties paleista svyruoklė atsiduria taške *O* (8.3.1 pav.), nuo svyravimo pradžios gali būti praėjęs ketvirtis arba trys ketvirčiai periodo. Praėjus ketvirčiui periodo $\left(t = \frac{T}{4}\right)$, svyravimo fazė $\varphi = 2\pi \cdot \frac{1}{4} = \frac{\pi}{2}$ rad, o, praėjus pusei periodo, $\varphi = \pi$ rad. Vadinasi, bet kurią laiko vertę, išmatuotą periodo dalimis, atitinka fazės vertė radianais.

Grafiku galime pavaizduoti svyruojančio kūno koordinatės priklausomybę ne tik nuo laiko, bet ir nuo fazės, tereikia horizontaliojoje ašyje vietoj laiko t verčių atidėti įvairias fazės φ vertes. Gauname kreivę, pavaizduotą 8.3.2 paveiksle.

Harmoningai svyruojančio kūno koordinatė kinta pagal sinuso arba kosinuso dėsnį. Kurią šių funkcijų reikia naudoti aprašant harmoninį svyravimą? Tai priklauso nuo to, kaip pradeda svyruoti kūnas. Jei svyravimas sužadinamas trumpalaikiu postūmiu, patogiau naudoti sinuso funkciją:

$$x = x_m \sin(\omega t). \tag{8.7}$$

Jei pradiniu laiko momentu kūnas būna labiausiai nutolęs nuo pusiausvyros padėties, svyravimą geriau apibūdinti formule, kurioje yra kosinusas:

$$x = x_m \cos(\omega t). \tag{8.8}$$

Šiuo atveju harmoninį svyravimą būtų galima nusakyti ir sinuso funkcija:

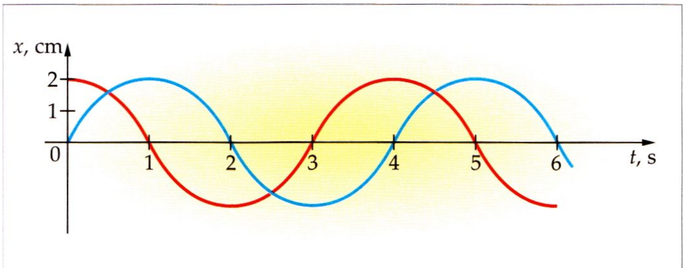
$$x = x_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (8.9)$$

Kai pradiniu laiko momentu ($t = 0$) kūnas būna toliausiai nuo pusiausvyros padėties (kraštinėje padėtyje), pradinė fazė $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$, o kai pradeda svyruoti iš pusiausvyros padėties, pradinė fazė lygi nuliui. Vartojant pradinės fazės sąvoką, (8.9) lygtį galima užrašyti taip:

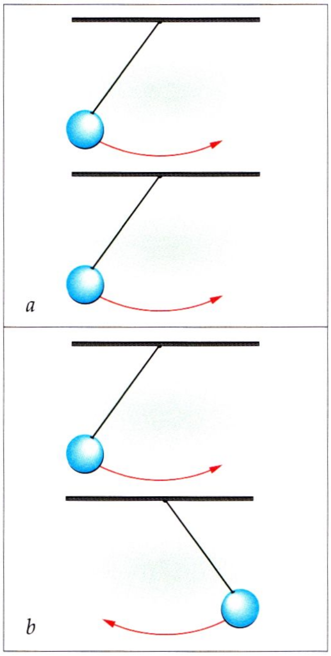
$$x = x_m \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (8.10)$$

Fazių skirtumas

Svyravimų, kuriuos apibūdina (8.7) ir (8.10) lygtys, skiriasi tik fazės. Jų skirtumas $\Delta\varphi$, arba kitaip – fazių poslinkis, lygus $\frac{\pi}{2}$. ***Norint nustatyti dviejų svyravimų fazių skirtumą, reikia abu svyravimus išreikšti ta pačia trigonometrine funkcija (sinusu arba kosinusu).*** 8.3.3 paveiksle pavaizduoti du harmoniniai svyravimai, kurių fazių skirtumas yra $\frac{\pi}{2}$.



8.3.3 pav.



8.3.4 pav.

Svyravimai, kurių fazių skirtumas lygus nuliui, vadinami ***sinchròniniais***. Jų fazės yra vienodos (8.3.4 pav., *a*). Sinchroniškai plaukiančių sportininkų visi judesiai yra suderinti, vyksta tuo pat metu (8.3.5 pav.), vienodomis fazėmis. Svyravimai, kurių skirtumas lygus pusei periodo, t. y. $\Delta\varphi = \frac{1}{2}T = \pi$, yra priešingų fazių (8.3.4 pav., *b*).

8.3.5 pav.

Harmoningai svyruojančio kūno greitis

Harmoningai svyruojančio kūno greitis, kaip ir koordinatė, kinta harmoningai, tačiau to kūno ***greičio fazė yra pasislinkusi koordinatės fazės atžvilgiu per*** $\frac{\pi}{2}$ (plg. 8.3.6 pav., *a* ir *b*). Tuo nesunku įsitikinti.

Sakykime, kad svyruojančio kūno koordinatė x laikui bėgant išreiškiama (8.8) lygtimi. Tada kūno greičio projekcija[1] lygi

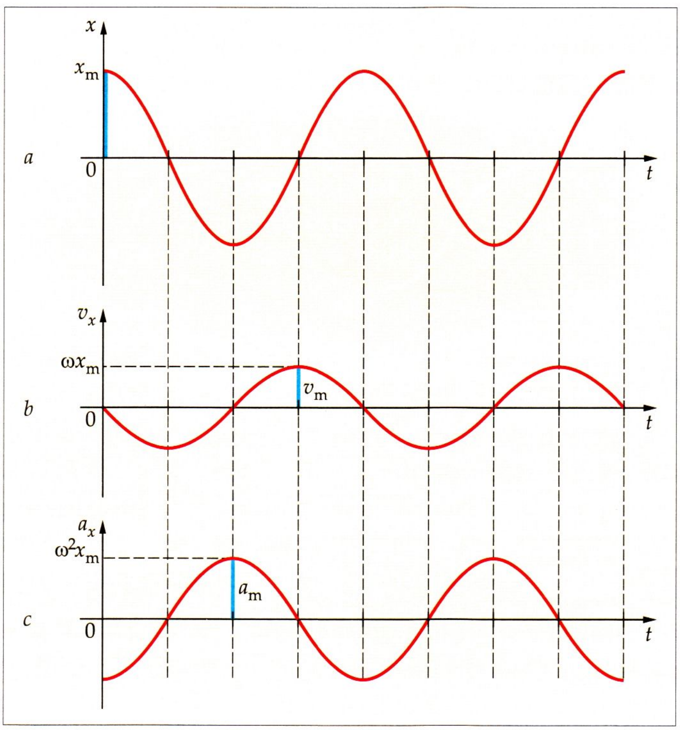
$$v_x = \omega x_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (8.11)$$

Tuo momentu, kai koordinatės modulis didžiausias, kūno greitis lygus nuliui, o kai koordinatė lygi nuliui, kūnas įgyja didžiausią greitį (8.1.2 pav.). Didžiausia greičio modulio vertė yra svyravimo greičio amplitudė v_m. Su poslinkio amplitude ji susijusi taip:

$$v_m = \omega x_m. \qquad (8.12)$$

(8.11) formulėje svyravimo greičio amplitudė rašoma prieš kosinuso funkciją.

8.3.6 pav.



[1] Matematiniu požiūriu svyruojančio kūno greičio projekcija yra koordinatės x ($x = x_m \cos(\omega t)$) išvestinė laiko atžvilgiu, todėl
$v_x = x' = -\omega x_m \sin(\omega t) =$
$= \omega x_m \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Harmoningai svyruojančio kūno pagreitis

Harmoningai svyruojančio kūno pagreitis taip pat kinta harmoningai. ***Pagreičio fazės poslinkis koordinatės fazės atžvilgiu lygus*** π[1] (plg. 8.3.6 pav., *a* ir *c*). Vadinasi, tuo pačiu momentu pagreičio ir koordinatės moduliai būna didžiausi, o ženklai – priešingi. Kitaip tariant, svyravimai yra priešingų fazių:

$$a_x = \omega^2 x_m \cos(\omega t + \pi). \qquad (8.13)$$

Didžiausia pagreičio vertė yra svyravimo pagreičio amplitudė a_m. (8.13) formulėje ji rašoma prieš kosinuso funkciją:

$$a_m = \omega^2 x_m. \qquad (8.14)$$

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname svyravimo faze? Kokiais vienetais ji matuojama?

2. Ar gali rutuliukai svyruoti skirtingomis amplitudėmis, tačiau vienodomis fazėmis? Atsakymą pagrįskite iliustruodami piešiniu.

3. Kaip susijęs harmoningai svyruojančio kūno greičio kitimas su koordinatės kitimu?

4. Kaip susijęs harmoningai svyruojančio kūno pagreičio kitimas su koordinatės kitimu?

5. Prie spyruoklės prikabinto kūno svyravimo amplitudė 0,2 m, periodas 0,1 s, o pradinė fazė lygi nuliui. Pradiniu momentu kūnas buvo viršutinėje padėtyje.

a) Parašykite kūno svyravimą apibūdinančią lygtį.

b) Nubraižykite kūno koordinatės, greičio ir pagreičio priklausomybės nuo laiko grafikus.

c) Kokia lygtis nusakytų kūno svyravimą, jei pradiniu momentu kūnas būtų pusiausvyros padėtyje?

6. Ant ilgo siūlo pakabinto pasvaro koordinatė kinta pagal dėsnį, išreiškiamą formule $x = 0{,}4\cos\left(2\pi t - \frac{\pi}{2}\right)$.

a) Apskaičiuokite pasvaro svyravimo dažnį ω.

b) Nubraižykite pasvaro koordinatės, greičio ir pagreičio priklausomybės nuo laiko grafikus.

[1] Matematiniu požiūriu svyruojančio kūno pagreičio projekcija yra greičio projekcijos išvestinė laiko atžvilgiu: $a_x = v_x' = -\omega^2 x_m \cos(\omega t) = \omega^2 x_m \cdot \cos(\omega t + \pi)$.

8.4. Laisvojo svyravimo energija. Svyravimo dėsniai

Pagrindinės sąvokos

Slopìnamasis svyrãvimas,

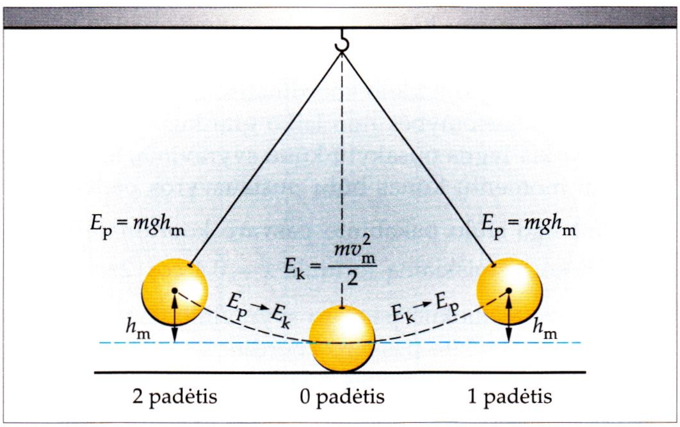
matemãtinės svyruõklės svyrãvimo periòdas,

prie spyruõklės pritvìrtinto rutuliùko svyrãvimo periòdas.

Laisvojo svyravimo energija

VIII klasėje sužinojote, kam lygi ir kaip kinta ant siūlo pakabinto rutuliuko (matematinės svyruoklės modelio) laisvojo svyravimo energija (8.4.1 pav.). Nukreipiant svyruoklę iš pusiausvyros padėties į 1 padėtį, atliekamas darbas. Svyruoklė dėl to įgyja potencinės energijos $E_p = mgh_m$, o rutuliuko pakilimo aukštis Žemės paviršiaus (nulinio lygio) atžvilgiu yra didžiausias. Kai rutuliukas juda pusiausvyros padėties link, jo pakilimo aukštis Žemės paviršiaus atžvilgiu mažėja, o greitis ir kinetinė energija didėja. Pusiausvyros padėtyje (0 padėtis) rutuliuko kinetinė energija yra didžiausia $\left(E_k = \frac{mv_m^2}{2}\right)$, o potencinė – mažiausia ($E_p = 0$). Kai rutuliukas tolsta nuo pusiausvyros padėties, jo greitis mažėja, o pakilimo aukštis didėja. Rutuliuko kinetinė energija virsta potencine. Kraštinėje padėtyje (2 padėtyje) rutuliuko potencinė energija yra didžiausia ($E_p = mgh_m$), o kinetinė lygi nuliui ($E_k = 0$). Svyruoklei svyruojant, rutuliuko kinetinės ir potencinės energijos virsmai ($E_k \rightleftarrows E_p$) periodiškai kartojasi.

8.4.1 pav.

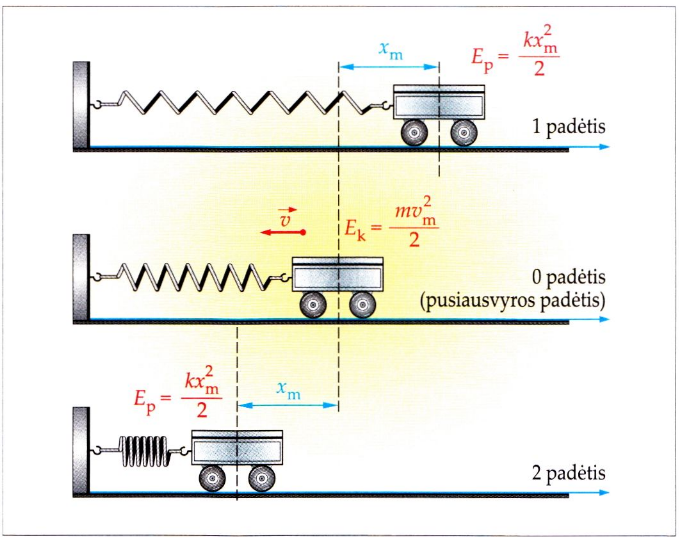


Rutuliuko pilnutinė mechaninė energija lygi jo potencinės ir kinetinės energijos sumai:

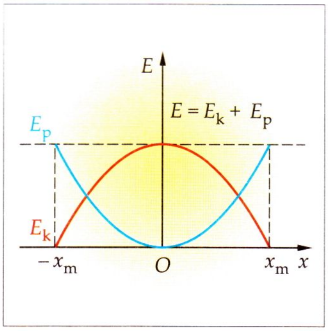
$$E = E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} + mgh = mgh_m. \quad (8.15)$$

Dabar aptarkime spyruoklinės sistemos – prie spyruoklės pritvirtinto vežimėlio pilnutinę mechaninę energiją ir jos virsmus (8.4.2 pav.). Pradiniu laiko momentu vežimėlis yra patrauktas iš pusiausvyros padėties atstumu x_m (1 padėtis), taigi sistemos potencinė energija $E_p = \frac{kx_m^2}{2}$. Paleiskime vežimėlį. Jis ims riedėti pusiausvyros padėties link. Vežimėlio potencinė energija mažės, kinetinė didės. Kai vežimėlis eis per pusiausvyros padėtį (0 padėtį), jo kinetinė energija bus didžiausia $\left(E_k = \frac{mv_m^2}{2}\right)$, o potencinė lygi nuliui ($E_p = 0$). Kitoje kraštinėje padėtyje (2 padėtyje) vežimėlio potencinė energija bus didžiausia, o kinetinė lygi nuliui. Taigi svyruojančio vežimėlio potencinė energija virs kinetine ir atvirkščiai. Jei sistema bus uždara (vežimėlio neveiks pasipriešinimo jėgos), tai pilnutinė mechaninė energija išliks pastovi:

$$E = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}. \quad (8.16)$$



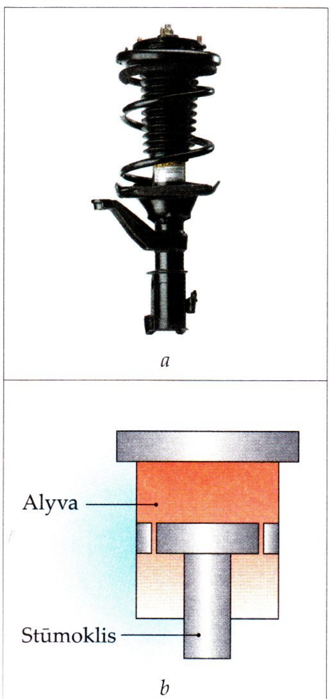
8.4.2 pav.



8.4.3 pav.

8.4.4 pav.

8.4.5 pav.



Sistemos pilnutinę mechaninę energiją ir kinetinės bei potencinės energijos kitimą galima pavaizduoti grafiškai (8.4.3 pav.).

Slopinamasis svyravimas

Mechaninis svyravimas paprastai susijęs su energijos nuostoliais. Judantis kūnas sąveikauja su kitais kūnais, todėl dalis jo mechaninės energijos virsta vidine atomų ir molekulių šiluminio judėjimo energija. Svyravimo amplitudė laipsniškai mažėja, ir po tam tikro laiko tarpo svyruojantis kūnas sustoja. Pavyzdžiui, ant siūlo pakabintas rutuliukas, piltuvėlis su smėliu (8.2.3 pav.) laikui bėgant svyruoja vis silpniau. Galiausiai svyravimas visiškai nuslopsta. Taip nutinka dėl to, kad dalis svyruojančio kūno mechaninės energijos naudojama oro pasipriešinimui nugalėti. Dėl trinties kūno ir oro vidinė energija didėja, o mechaninė energija mažėja. Svyravimas, kurį slopina pasipriešinimo jėgos, vadinamas ***slopìnamuoju***. Slopinamojo svyravimo amplitudė ilgainiui mažėja.

Slopinamasis svyravimas turi praktinę reikšmę. Motocikluose ir automobiliuose įrengiami amortizãtoriai, t. y. specialūs prietaisai kėbulo svyravimui slopinti (8.4.4 pav.). Jie sudaryti iš stūmoklių, kurie klampiame skystyje (dažniausiai alyvoje) juda žemyn ir aukštyn (8.4.5 pav., *a* ir *b*). Jei amortizatorių nebūtų, spyruoklės automobilio kėbulą sūpuotų ilgiau. Amortizatorių slopinimo efektyvumas priklauso nuo spyruoklės ir amortizatoriaus medžiagos bei matmenų. Ilgai naudojant automobilį ar motociklą, amortizatoriai susidėvi ir juos tenka keisti.

Svyravimo dėsniai

Išsiaiškinkime, nuo ko priklauso skirtingų sistemų – matematinės ir spyruoklinės svyruoklės – svyravimo periodas.

Spyruoklinės svyruoklės (prie spyruoklės pritvirtinto vežimėlio) svyravimo periodo formulę išvesime remdamiesi pilnutinės mechaninės energijos tvermės dėsniu. Kai vežimėlis eina per pusiausvyros padėtį (8.4.2 pav.), jo kinetinė energija yra didžiausia ir lygi didžiausiai potencinei energijai svyravimo pradžioje:

$$\frac{mv_m^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}. \quad (8.17)$$

Remdamiesi (8.17) formule ir atsižvelgdami į judėjimo apskritimu greitį

$$v_m = \frac{2\pi x_m}{T}, \tag{8.18}$$

gauname spyruoklinės svyruoklės svyravimo periodo išraišką[1]:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \tag{8.19}$$

Matome, kad spyruoklinės svyruoklės svyravimo periodas priklauso nuo svyruojančio kūno masės. Kuo ji didesnė, tuo didesnis svyravimo periodas, t. y. tuo lėčiau juda kūnas. Antra vertus, svyruoklės svyravimo periodas priklauso nuo spyruoklės standumo: kuo standesnė spyruoklė (didesnis jos standumo koeficientas), tuo mažesnis svyravimo periodas. Taigi ***spyruoklinės svyruoklės svyravimo periodas yra tiesiogiai proporcingas kvadratinei šakniai iš svyruoklės masės ir atvirkščiai proporcingas kvadratinei šakniai iš spyruoklės standumo koeficiento.***

Tirdamas matematinės svyruoklės svyravimo dėsnius, olandų mokslininkas Kristianas Heigensas (*Christian Huygens*, 1629–1695) nustatė, kad ***jos svyravimo periodas yra tiesiogiai proporcingas kvadratinei šakniai iš svyruoklės ilgio ir atvirkščiai proporcingas kvadratinei šakniai iš laisvojo kritimo pagreičio*:**

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \tag{8.20}$$

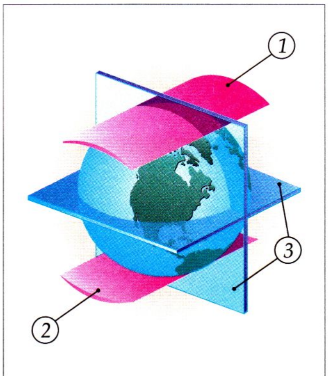
Kristianas Heigensas

Heigenso išvadas nesudėtinga patvirtinti bandymais. Prie stovo ilgais siūlais pririškime du tokio pat dydžio rutuliukus, padarytus iš skirtingų medžiagų, pavyzdžiui, plieno ir švino, taip, kad gautos svyruoklės būtų vienodo ilgio. Patraukime abu rutuliukus į šoną. Svyruoklės svyruos sinchroniškai, t. y. tokiu pat periodu, nors jų masė yra skirtinga. Keisdami rutuliukų masę, įsitikintume, kad svyravimo periodas nuo jos nepriklauso. Dabar vienodos masės rutuliukus pririškime prie stovo skirtingo ilgio siūlais ir vėl paleiskime svyruoti. Matysime: kuo ilgesnis siūlas, tuo didesniu periodu svyruoja rutuliukas. Žinant matematinės svyruoklės svyravimo periodą, pagal (8.20) formulę galima apskaičiuoti laisvojo kritimo pagreitį. Tuo pagrįstas svyruoklės taikymas prietaisuose, kurie naudojami geologiniams tyrinėjimams. Pakitusi kurioje nors

[1] Pamėginkite šią formulę išvesti patys.

Žemės vietoje laisvojo kritimo pagreičio vertė rodo, kad ten yra iškasenų. Vietovėse, kur slūgso tankios uolienos, pavyzdžiui, metalų rūdos, g vertė yra didesnė už vidutinę. Priešingai, jei po Žemės pluta yra didelių druskos kupolų (dažnai susijusių su naftos bei dujų telkiniais), be to, jie slūgso negiliai, tai laisvojo kritimo pagreičio vertė tose vietose yra mažesnė už vidutinę.

Remiantis Heigenso išvesta matematinės svyruoklės periodo formule, nustatyta, kad Žemės rutulys ties ašigaliais yra šiek tiek suplotas: laisvojo kritimo pagreičio vertės ašigaliuose ir pusiaujyje skiriasi. Jeigu Žemę įdėtume į menamų plokštumų (*3*) kiaurymes (8.4.6 pav.), kurių skersmuo būtų lygus pusiaujiniam Žemės skersmeniui, tai ties ašigaliais tilptų du pleištai (*1* ir *2*). Tikroji Žemės forma vadinama geoidù.



8.4.6 pav.

Laisvojo kritimo pagreitis priklauso nuo atstumo iki Žemės paviršiaus. Tolstant nuo Žemės, jis mažėja. Dėl to matematinės svyruoklės (svyruoklinio laikrodžio) svyravimo periodas didėja. Pakeltas į 330 m aukštį, pavyzdžiui, į Berlýno televizijos bokštą (361,5 m), Eifèlio bokštą (305 m) Parỹžiuje ar Vìlniaus televizijos bokštą (326 m), svyruoklinis laikrodis pradėtų vėluoti maždaug 4 s.

Klausimai ir užduotys

1. Pateikite slopinamojo svyravimo pavyzdžių.

2. Naudodamiesi 8.4.2 paveikslu, atsakykite į klausimus:
a) kuriuose trajektorijos taškuose svyruojantis vežimėlis turi tik potencinės energijos;
b) kuriuose trajektorijos taškuose svyruojantis vežimėlis turi tik kinetinės energijos;
c) kiek kartų per vieną svyruoklės svyravimo periodą potencinė energija virsta kinetine ir atvirkščiai;
d) kuriais momentais kinetinė svyruojančio vežimėlio energija lygi potencinei jo energijai;
e) kam lygi svyruojančio vežimėlio pilnutinė mechaninė energija?

3. Kaip pakis ant siūlo pakabinto rutuliuko (matematinės svyruoklės) svyravimo dažnis, kai:
a) rutuliuko masę padidinsime 2 kartus;
b) siūlą pailginsime 3 kartus?

4. Kaip pakis prie spyruoklės prikabinto vežimėlio (spyruoklinės svyruoklės) svyravimo periodas ir dažnis, kai vežimėlio masę padidinsime dvigubai?

5. Išveskite matematinės svyruoklės svyravimo dažnio formulę.

Mokomės spręsti uždavinius

1. Tarkime, kad 8.4.2 paveiksle pavaizduotos sistemos parametrai yra tokie: vežimėlio masė 0,5 kg, spyruoklės standumo koeficientas 50 N/m, svyravimo amplitudė 0,02 m. Apskaičiuokime:

a) pilnutinę mechaninę vežimėlio energiją;

b) didžiausią vežimėlio greitį.

E – ?	m = 0,5 kg
v_m – ?	k = 50 N/m
	x_m = 0,02 m

Sprendimas

a) Pilnutinė mechaninė vežimėlio energija lygi potencinei jo energijai pradiniu momentu (1 padėtis):

$$E = E_p = \frac{kx_m^2}{2}.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$E = \frac{50\ \mathrm{N/m} \cdot (0{,}02\ \mathrm{m})^2}{2} = 0{,}01\ \mathrm{J}.$$

b) Didžiausią greitį vežimėlis įgyja eidamas per pusiausvyros padėtį. Tada kinetinė jo energija yra didžiausia ir lygi pilnutinei energijai:

$$E = E_k = \frac{mv_m^2}{2}.$$

Iš čia $v_m = \sqrt{\frac{2E}{m}}$. Įrašome dydžių vertes ir apskaičiuojame:

$$v_m = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}01\ \mathrm{J}}{0{,}5\ \mathrm{kg}}} = 0{,}2\ \mathrm{m/s}.$$

Atsakymas: a) 0,01 J; b) 0,2 m/s.

2. Kiek kartų per 3 min susvyruos matematinė svyruoklė, kurios ilgis 3 m?

n – ?	t = 3 min = 180 s
	l = 3 m
	g = 9,8 m/s^2

Sprendimas

Matematinės svyruoklės svyravimo periodą apskaičiuojame pagal formulę

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Svyravimų skaičių per nurodytą laikotarpį randame taip:

$$n = \frac{t}{T} = \frac{t}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$n = \frac{180\ \text{s}}{2\cdot 3{,}14}\sqrt{\frac{9{,}8\ \text{m/s}^2}{3\ \text{m}}} \approx 52.$$

Atsakymas: 52 kartus.

Užduotys savarankiškam darbui

1. Per 1 min svyruoklė susvyruoja 48 kartus. Apskaičiuokite jos svyravimo periodą ir dažnį. (1,25 s; 0,8 Hz)

2. Žemės paviršiuje svyruoklės svyravimo dažnis lygus 0,5 Hz. Koks jis bus Marso paviršiuje, kur laisvojo kritimo pagreitis lygus 3,71 m/s^2? (≈0,3 Hz)

3. Prie spyruoklės prikabintas rutulys, kurio masė 400 g. Kokiu atstumu nuo pusiausvyros padėties reikia patraukti rutulį, kad, eidamas per pusiausvyros padėtį, jis įgytų 1 m/s greitį? Spyruoklės standumo koeficientas lygus 10 N/m. (20 cm)

4. Kokiu atstumu (skaičiuojant amplitudės dalimis) nuo pusiausvyros padėties potencinė kūno energija lygi kinetinei energijai? ($0{,}71x_{\text{m}}$)

5. Prie spyruoklės prikabintas rutuliukas buvo 2 cm patrauktas nuo pusiausvyros padėties ir paleistas. Rutuliukas svyravo 5 Hz dažniu. Kokį kelią jis nuėjo per 1 s? Tarkite, kad svyravimas buvo neslopinamasis. (0,4 m)

6. Sferiniu paviršiumi be trinties svyruoja kubelis (8.4.7 pav.). Paviršiaus kreivumo spindulys lygus *R*. Koks yra kubelio svyravimo periodas?

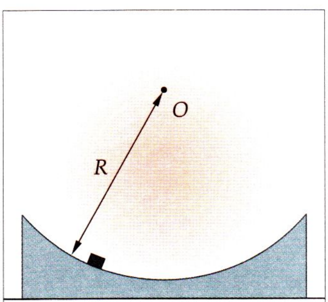
7. Per 2 s matematinė svyruoklė susvyruoja vieną kartą. Atsižvelgdami į tai, atsakykite į klausimus:
- a) kokio ilgio yra ši svyruoklė; (≈1 m)
- b) kiek kartų ir kaip reikia pakeisti jos ilgį, kad svyravimo dažnis padidėtų dvigubai? (4 kartus)

8. Prie spyruoklės prikabinto kūno svyravimo periodas lygus *T*. Kūno masę padidinus 60 g, svyravimo periodas padvigubėja. Kokia yra pradinė kūno masė? (0,02 kg)

9. Dviejų spyruoklių ilgis skiriasi 0,22 m. Tame pačiame fizikos kabinete per tą patį laiką viena jų susvyruoja 30 kartų, o kita – 36 kartus. Apskaičiuokite kiekvienos spyruoklės ilgį. (0,5 m; 0,72 m)

10. Prie spyruoklės pritvirtintas 0,1 kg masės kūnas patraukiamas 4 cm nuo pusiausvyros padėties. Spyruoklės standumo koeficientas lygus 10 N/m. Parašykite šios svyruoklės svyravimo lygtį $x = x(t)$.

8.4.7 pav.



8.5. Mechaninis rezonansas

Neslopinamasis svyravimas

Nagrinėjome dviejų sistemų – matematinės ir spyruoklinės svyruoklės – laisvąjį svyravimą. Suprantama, kad svyruoklė galėtų taip svyruoti, reikia pradiniu momentu suteikti jai energijos – patraukti rutuliuką iš pusiausvyros padėties (8.5.1 pav.). Kadangi rutuliuką veikia trinties jėga, tai jo mechaninė energija, o kartu ir svyravimo amplitudė mažėja.

Prarastą sistemos energiją galima grąžinti arba net padidinti. Tereikia veikti sistemą periodine išorine jėga. Svyravimas, kurį palaiko periodinė išorinė jėga, kaip žinome, vadinamas priverstiniu. Atlikdama darbą, išorinė jėga papildys sistemos energiją ir neleis trinties jėgoms nuslopinti svyravimo. Toks priverstinis svyravimas vadinamas ***neslopìnamuoju***. Pavyzdžiui, jei prie spyruoklės pritvirtintą rutulį (8.5.1 pav.) pradėsime periodiškai stumdyti aukštyn ir žemyn, rutulys svyruos nesustodamas. Šiuo atveju jo svyravimas bus neslopinamasis.

Kaip žinome, laisvojo svyravimo periodas, taigi ir dažnis, priklauso nuo sistemos savybių. Pavyzdžiui, matematinės svyruoklės svyravimo dažnis pareina nuo svyruoklės ilgio ir laisvojo kritimo pagreičio. Laisvojo svyravimo dažnis, priklausantis nuo sistemos parametrų, vadinamas ***savúoju svyrãvimo dažniù*** ir paprastai žymimas raide ν_0:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}}. \tag{8.21}$$

Spyruoklinės svyruoklės savasis svyravimo dažnis priklauso nuo spyruoklės standumo ir pritvirtinto pasvaro masės:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}}. \tag{8.22}$$

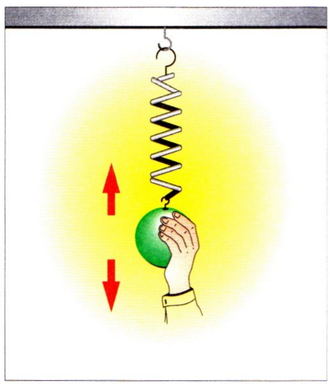
Pagrindinės sąvokos

Neslopìnamasis svyrãvimas,

savàsis svyrãvimo dãžnis,

mechãninis rezonánsas.

8.5.1 pav.



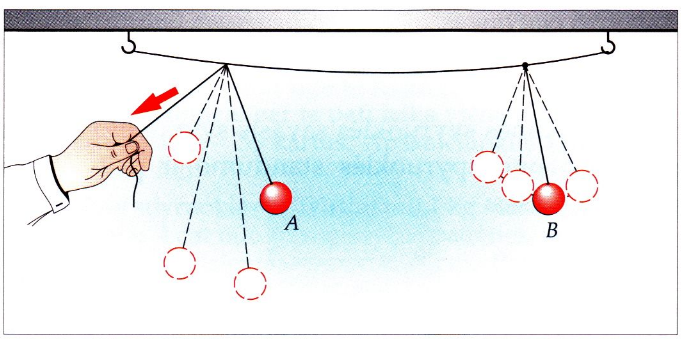
Priverstinio svyravimo, kitaip negu laisvojo, dažnis nepriklauso nuo sistemos savybių. Jį lemia tik veikiančios išorinės jėgos kitimo dažnis. Pavyzdžiui, automobilio vairuotojui stipriau spaudžiant greičio pedalą, padidėja variklio stūmoklio svyravimo dažnis, siuvėjai spustelint elektrinės siuvamosios mašinos pedalą – adatos svyravimo dažnis.

Mechaninis rezonansas

Sistemos savasis svyravimo dažnis gali sutapti su išorinės jėgos kitimo dažniu. Šis sutapimas yra labai svarbus. Tuo įsitikinsime atlikdami bandymą.

Ant stipriai įtemptos virvės pakabinkime dvi svyruokles: *A* ir *B* (8.5.2 pav.). Svyruoklės *B* ilgis tebūna pastovus, o svyruoklės *A* ilgį keiskime traukdami laisvąjį jos siūlo galą. Pradiniu momentu svyruoklę *A* padarykime ilgesnę už svyruoklę *B* ir paleiskime svyruoti. Svyruoklė *B* taip pat ims siūbuoti. Keisdami svyruoklės *A* ilgį, stebėkime svyruoklę *B*. Matysime, kad jos amplitudė kinta. Kai svyruoklių *A* ir *B* ilgis pasidaro vienodas, svyruoklės *B* amplitudė padidėja. Šį reiškinį galima paaiškinti taip: keisdami svyruoklės *A* ilgį, kartu keičiame svyruoklę *B* veikiančios ir verčiančios svyruoti jėgos kitimo dažnį. Svyruoklės *B* svyravimo priežastis yra periodinis įtemptos virvės svyravimas svyruoklės *A* svyravimo dažniu. Kuo artimesnis jėgos, verčiančios svyruoklę *B* svyruoti, dažnis savajam svyruoklės *B* svyravimo dažniui, tuo daugiau jėgos impulsų padeda didėti svyruoklės *B* amplitudei. Priverstinio svyruoklės *B* svyravimo amplitudė įgyja didžiausią vertę, kai savasis jo dažnis sutampa su išorinės jėgos (svyruoklės *A*) kitimo dažniu.

8.5.2 pav.



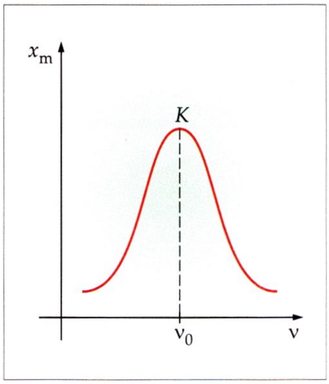
Mažinant svyruoklės *A* ilgį ir didinant jos svyravimo dažnį, svyruoklės *B* svyravimo amplitudė ims mažėti. Kai išorinės jėgos kitimo dažnis labai padidės, ši amplitudė pasidarys artima nuliui.

Reiškinys, kurio metu išorinės jėgos kitimo dažnis sutampa su kūno savuoju svyravimo dažniu ir dėl to kūno priverstinio svyravimo amplitudė labai padidėja, vadinamas mechãniniu rezonánsu (lot. *resonans* – atliepiantis, aidintis).

Rezonanso reiškinį galima paaiškinti remiantis energijos tvermės dėsniu. Vykstant rezonansui, priverstinio svyravimo energija yra didžiausia, nes išorinė jėga geriausiai perduoda ją sistemai. Kai išorinė jėga veikia į taktą su laisvuoju svyravimu, per visą periodą jos kryptis sutampa su svyruojančio kūno greičio kryptimi, todėl ši jėga atlieka tik teigiamą darbą. Svyravimui nusistovėjus, teigiamas išorinės jėgos darbas susilygina su neigiamu trinties darbu.

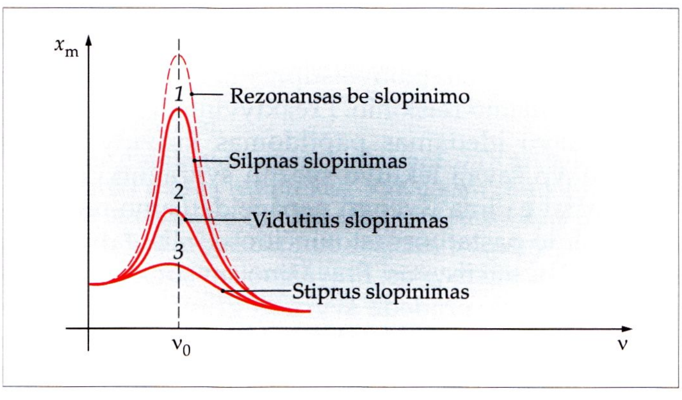
Priverstinio svyravimo amplitudės priklausomybę nuo išorinės periodinės jėgos kitimo dažnio pavaizduokime grafiškai (8.5.3 pav.). Koordinačių ašyje *Ox* atidėkime priverstinio svyravimo dažnį, ašyje *Oy* – jį atitinkančią svyravimo amplitudę. Kai priverstinio svyravimo dažnis ν sutampa su sistemos savuoju svyravimo dažniu ν_0, amplitudė įgyja didžiausią vertę (ją atitinka grafiko taškas *K*). Kreivė, vaizduojanti svyravimo amplitudės priklausomybę nuo išorinės jėgos kitimo dažnio, vadinama ***rezonánso kreivė***. Iš jos matyti: kai priverstinės jėgos kitimo dažnis ν yra mažesnis arba didesnis už savąjį sistemos svyravimo dažnį ν_0, amplitudė sumažėja.

8.5.3 pav.



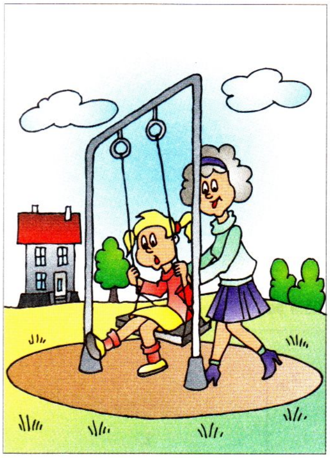
Priverstinio svyravimo amplitudė, esant rezonansui, priklauso nuo aplinkos slopinimo (trinties)

8.5.4 pav.



(8.5.4 pav.). Kai jis silpnas, amplitudė yra didelė (*1* rezonanso kreivė), o rezonanso kreivės viršūnė – smaili (rezonansas „aštrus"), kai stiprus, amplitudė yra maža (*3* rezonanso kreivė), o kreivės viršūnė – buka (rezonansas „bukas").

Rezonanso reikšmė buityje ir technikoje



8.5.5 pav.

Mechaninio rezonanso reiškinys sudaro galimybę palyginti maža išorine jėga smarkiai padidinti kūno svyravimo amplitudę. Todėl jis taikomas įrenginiuose, kurie naudojami kalnakasyboje, tiesiant kelius ir pan.

Rezonansas reiškiasi ir buityje. Su juo susidūrėte dar vaikystėje, supdamiesi sūpuoklėmis. Norėdami jas stipriau įsiūbuoti, bandėte tai daryti patys arba prašėte draugų. Pastumdami sūpuokles, draugai veikė jas periodine išorine jėga. Jei tokia jėga paveikia sūpuokles po pusės jų svyravimo periodo, tai sūpuoklių svyravimo amplitudė ne didėja, o mažėja, taigi jos stabdomos. Tačiau jei išorinė jėga (pavyzdžiui, šalia sūpuoklių stovinti mama) veikia sūpuokles tokiu pat dažniu, kokiu jos siūbuoja pačios, tai sūpuoklės įsilinguoja gana smarkiai (8.5.5 pav.).

Kiekvienas tamprus kūnas, pavyzdžiui, pastatas, tiltas, laivo ar lėktuvo korpusas, mašinos velenas, yra sistema, turinti savąjį svyravimo dažnį. Dėl variklio dalių judėjimo arba nepakankamai tikslaus besisukančių jo detalių centravimo atsiranda periodinės jėgos. Jeigu jų kitimo dažnis sutampa su sistemos laisvojo svyravimo dažniu, įvyksta rezonansas.

Rezonansas gali sukelti nepageidaujamų, o kartais ir tragiškų padarinių. Dėl jo subyrėdavo pirmieji reaktyviniai lėktuvai, pasiekę greitį, artimą garso greičiui (1200 km/h). Taip atsitikdavo dėl to, kad lėktuvų sparnų svyravimo dažnis sutapdavo su oro sūkurių dažniu. Vėliau buvo suprasta, kaip išvengti šio nepageidaujamo reiškinio. Į reaktyvinio lėktuvo sparnus būdavo įdedamas papildomas krovinys, kuris pakeisdavo savąjį lėktuvo sparnų svyravimo dažnį.

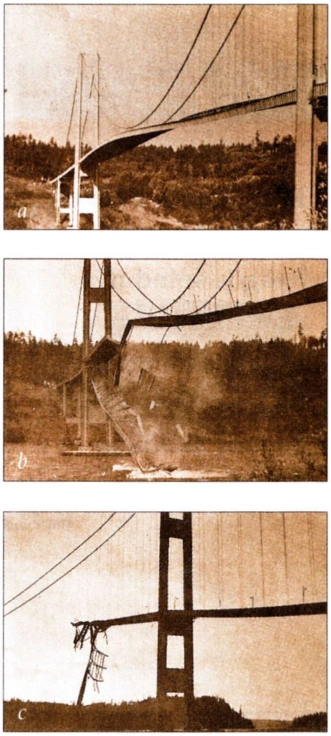
Panašiai galima išvengti nepageidaujamo rezonanso reiškinio pastatuose, stovinčiuose šalia gatvių, kur eismas labai intensyvus. Pravažiuojant sunkiasvoriams automobiliams, pradeda svyruoti gruntas. Jei savasis langų stiklų svyravimo dažnis sutampa su grunto svyravimo dažniu, stiklai ima stipriai virpėti. Norint

to išvengti, prie jų centre galima priklijuoti plastilino gabalėlį. Jis padidins sistemos masę ir kartu pakeis savąjį jos svyravimo dažnį (8.22).

Per žemės drebėjimą paprastai sugriūva vienodo aukščio namai, nes savąjį jų svyravimo dažnį lemia aukštis. Kai savasis pastato svyravimo dažnis sutampa su žemės grunto svyravimo dažniu, pastatas ima svyruoti smarkiau ir sugriūva.

Rezonanso reiškinys sukėlė katastrofą Tauridės rūmuose Peterburge (1907 m.). Valstybės dūmos posėdžių salėje nuo lubų nukrito visas tinkas. Priežastis – nedidelis variklis, įtaisytas po lubomis ir skirtas ventiliacijai. Dėl rezonanso sugriuvo (1940 m.) Takòmos sąsiaurio tiltas (8.5.6 pav.), vadintas Šuoliuojančiu Gerčiu, nes vėjyje smarkiai svyruodavo. Tiltą sugriovė vėjas, pūtęs 68 km/h (18,9 m/s) greičiu. Būtų galima pateikti daugybę pavyzdžių, kai dėl rezonanso lūždavo varomieji laivų sraigtai, alkūniniai mašinų velenai, tiltai.

Aptarėme mechaninį rezonansą. Tačiau rezonansas dar gali būti kitos rūšies – elektrinis. Apie jį sužinosite nagrinėdami radijo ir televizijos ryšio principus. Rezonansas reiškiasi ir kitose fizikos srityse: akustikoje, atomo fizikoje.



8.5.6 pav.

Klausimai ir užduotys ??

1. Kokias žinote mechaninio svyravimo rūšis?

2. Kokiems svyravimams vykstant gali reikštis mechaninis rezonansas?

3. Pateikite mechaninio rezonanso pavyzdžių.

4. Kada sistemos rezonansinės savybės būna ryškiausios?

5. Pateikite siūlymų, kaip būtų galima panaudoti mechaninio rezonanso energijos išteklius.

6. Vasarą Lina svečiavosi pas močiutę. Vakare iš ganyklos mergaitė nešė puskibirį ką tik pamelžto šviežio karvės pieno. Ji pastebėjo, kad einant pienas kibire pradėjo stipriai taškytis. Mergaitė pakeitė ėjimo spartą, ir pienas nustojo teliūskuotis. Kodėl taip atsitiko? Paaiškinkite šį reiškinį.

7. Prie traukinio vagono lubų ant 0,75 m ilgio siūlo pakabintas mažas rutuliukas. Važiuojant traukiniui, dėl vagono stuksenimo į bėgių sandūras rutuliukas pradėjo svyruoti. Kokiu greičiu turi važiuoti traukinys, kad rutuliuko svyravimo amplitudė būtų didžiausia? Bėgio dalies tarp sandūrų ilgis 12,5 m. (7,2 m/s)

8. Parenkite projektą „Nepageidaujamas mechaninis rezonansas. Priemonės ir būdai jam išvengti“.

8.6. Mechaninės bangos

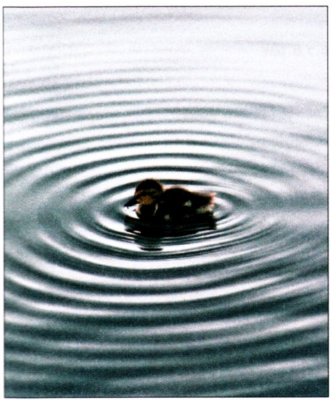
Pagrindinės sąvokos

Mechãninės bañgos, bangõs fròntas, bangõs spindulỹs, skersìnės bañgos, išilgìnės bañgos, bangõs il̃gis, bangõs sklidìmo greĩtis.

Mechaninių bangų sklidimas

Bangavimo reiškinių gausu mūsų planetoje: banguoja ežerų, upių, jūrų ir vandenynų paviršius. Per geografijos pamokas kalbėjote apie pačias didžiausias Žemėje bangas – cunãmį, kurį sukelia uraganai, žemės drebėjimai vandenynų gelmėse. Didžiausios cunamio bangos kyla Ramiajame vandenyne. Jų aukštis siekia net 30–40 m. Mūsų krašte rudenį ir pavasarį Baltijos jūroje per audras taip pat šėlsta bangos. Su savimi jos negailestingai pasiglemžia ir daug gražaus paplūdimio smėlio. Antra vertus, iš jūros gelmių bangos į krantą išmeta gintarų. Artimiausioje mums aplinkoje taip pat nesunku pamatyti bangavimo reiškinį. Mažas bangeles galima sukelti tvenkinio paviršiuje, mėtant į vandenį akmenukus arba judinant meškerę. Banguoja ne tik vandens paviršius. Pučiant vasaros vėjui, javų laukais taip pat ritasi bangos. Kas jos?

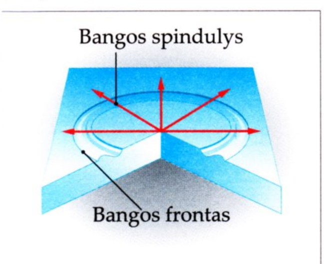
Milžiniškų cunamio bangų, Baltijos jūros bangų, mažų bangelių tvenkinio paviršiuje ir net bangų javų lauke susidarymas fizikiniu požiūriu aiškinamas vienodai. Visų šių bangų šaltinis yra svyravimas. Svyruoja vandens dalelės tvenkinio paviršiuje, javų stiebai pučiant vėjui. ***Bangà – tai svyravimo sklidimas erdvėje laikui bėgant.*** Bangos, sklindančios kurioje nors terpėje (dujose, skysčiuose, kietuosiuose kūnuose), vadinamos ***mechãninėmis bangomìs***. Kaip jos susidaro? Mechaninės bangos terpėse atsiranda veikiant tamprumo jėgoms. Bangų susidarymui vandens paviršiuje turi įtakos paviršiaus įtempties jėga ir sunkis.



8.6.1 pav.

Įmetus į vandenį akmenuką ar ant vandens nutūpus ančiai, nuo jų į visas puses ima sklisti banga (8.6.1 pav.). Vandens paviršius pradeda banguoti tuo momentu, kai į jį pataiko akmenukas arba prisiliečia anties kojos. Tačiau akmenukas yra tik bangos atsiradimo priežastis. Jam nustojus veikti, banga sklinda toliau, nes vandens dalelės perduoda poveikį vienos kitoms. Sklindant bangai, vanduo neteka, keičiasi tik jo paviršiaus forma. Pavyzdžiui, jei ant banguojančio vandens paviršiaus užmestume medžio lapą, plūdę ar žievės gabaliuką, jis neplauktų kartu su banga į priekį, o tik svyruotų toje pačioje vietoje aukštyn ir žemyn. Taip juda ir atskiros vandens dalelės: jos

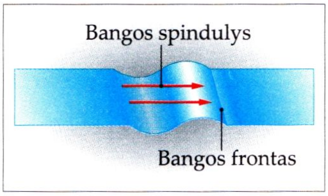
8.6.2 pav.



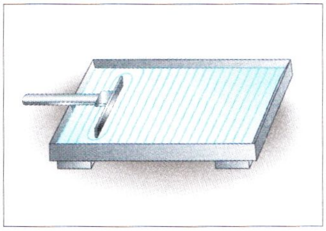
neslenka kartu su banga, o tik svyruoja aukštyn ir žemyn, t. y. statmenai vandens paviršiui, kuriuo slenka banga[1]. Vadinasi, sklindanti banga medžiagos neperneša, plinta tik terpės svyravimas. Bangai sklindant vandens paviršiumi, vanduo neteka, keičiasi (periodiškai pakyla ir nusileidžia) tik jo forma. Vanduo nesklinda kartu su banga.

Priekinė riba, skirianti banguojančią terpę nuo dar ramios srities, vadinama ***bangõs fròntu*** (8.6.2 ir 8.6.3 pav.). Statmena jam tiesė vadinama ***bangõs spiñduliu***. Spindulys rodo, kuria kryptimi sklinda banga. Bangos pagal jų fronto pobūdį skirstomos į plokščiąsias (8.6.4 pav.) ir rutulinės (žr. 8.6.1 pav.).

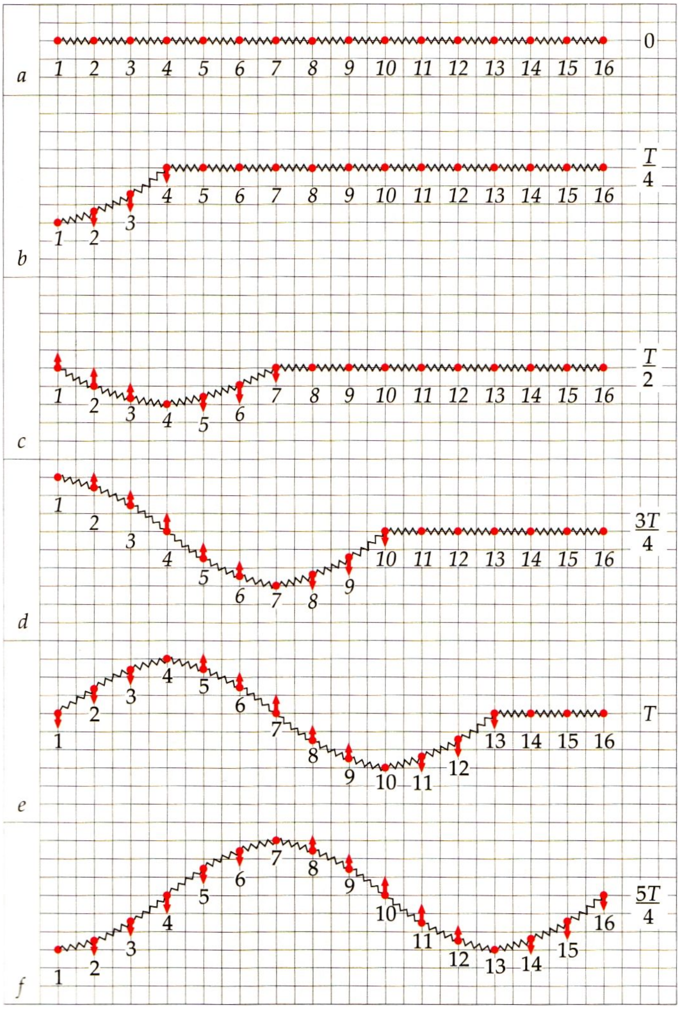
Bangų susidarymo vandens paviršiuje modelis pavaizduotas 8.6.5 paveiksle. Rutuliukai čia reiškia



8.6.3 pav.



8.6.4 pav.



8.6.5 pav.

[1] Čia aptariamas tik skersinės bangos plitimo vandens paviršiumi modelis. Iš tikrųjų skersinių bangų susidarymas vandens paviršiuje yra sudėtingesnis – vandens paviršiaus dalelės sukasi apskritimais vertikalioje plokštumoje, kuri yra lygiagreti su bangos sklidimo kryptimi. Tuo remiantis galima paaiškinti, kodėl Baltijos jūra išmeta į krantą gintarų.

vandens molekules, o spyruoklėlės – jas veikiančias tamprumo jėgas. Bangõs sužadinimo vietoje sutrikdoma *1* rutuliuko pusiausvyra (8.6.5 pav., *b*). Jis ima leistis žemyn. Spyruoklėlė, jungianti jį su *2* rutuliuku, išsitempia, todėl atsiranda tamprumo jėga, kuri veikia ne tik *1*, bet ir *2* rutuliuką. Kartu išsitempia spyruoklėlė, jungianti *2* rutuliuką su *3* rutuliuku. Išjudinti rutuliukai (*1*, *2* ir *3*) perduoda judesį kitiems. Kiekvienas naujai sužadintas rutuliukas ima svyruoti periodiškai aukštyn ir žemyn apie pusiausvyros padėtį. Kadangi rutuliukai yra vienodos masės, o spyruoklėlės – tokio pat standumo, tai visi rutuliukai svyruoja vienodu periodu ir vienoda amplitude. Tačiau rutuliukai turi masę, jie yra inertiški. Vadinasi, jų greičiui pasikeisti reikia laiko. Todėl *2* rutuliukas pradeda svyruoti vėliau už *1*, *3* – vėliau už *2*, *4* – vėliau už *5* ir t. t.

Bangos ilgis ir sklidimo greitis

Kai *1* rutuliukas jau būna susvyravęs vieną kartą (8.6.5 pav., *e*), *13* rutuliukas dar tik pradeda svyruoti. Vadinasi, jo svyravimas atsilieka nuo *1* rutuliuko svyravimo lygiai vienu svyravimo periodu T.

Atstumas, kuriuo išplinta svyravimas per laiko tarpą, lygų vienam periodui, vadinamas bangõs ilgiù. Iš VIII klasės kurso prisimenate, kad bangos ilgis žymimas raide λ (graikų abėcėlės raide, tariama „lambda"). Kadangi bangos ilgis yra atstumas, tai jis reiškiamas ilgio vienetais:

$$[\lambda] = 1\ \text{m}.$$

Iš mechaninių bangų modelio matyti, kad *13* rutuliukas sužadintas svyruoja taip pat kaip *1* rutuliukas. Tiek *1*, tiek *13* rutuliukas drauge ima judėti aukštyn, pasiekia pusiausvyros padėtį, leidžiasi žemyn ir baigia vieną svyravimo ciklą. Kitaip tariant, *1* ir *13* rutuliukai svyruoja sinchroniškai (vienodomis fazėmis). Iš čia išplaukia kitas bangos ilgio apibrėžimas: ***bangõs il̃gis – tai trumpiausias atstumas tarp dviejų artimiausių sinchroniškai (vienodomis fazėmis) svyruojančių taškų.***

Nesunku suprasti, kad sinchroniškai svyruoja ne tik *1* ir *13* rutuliukas, bet ir tie rutuliukai, kurie nutolę vienas nuo kito atstumu, lygiu vienam bangos ilgiui, dviem bangos ilgiams ir t. t.

Banga – svyravimo sklidimas terpe. Vienalyte terpe svyravimas sklinda pastoviu greičiu, todėl bangos

sklidimas yra tolyginis judėjimas. Susieti tarpusavyje tolygiai judančio kūno nueitą kelią, greitį ir judėjimo laiką mokėtės per matematikos pamokas V klasėje, taip pat prisiminėte nagrinėdami mechanikos pradmenis VIII klasėje. Analogiškai tolygiai judančio kūno nueito kelio, greičio ir laiko tarpusavio priklausomybei galima gauti bangos ilgio formulę:

$$s = vt,$$

$$\lambda = vT. \tag{8.23}$$

Kadangi per vieną periodą banga nueina atstumą λ (8.6.4 pav., *e*), tai jos greitis

$$v = \frac{\lambda}{T}. \tag{8.24}$$

Atsižvelgę į tai, kad svyravimo periodui atvirkščias dydis yra svyravimo dažnis, bangos greitį galime išreikšti taip:

$$v = \lambda\nu. \tag{8.25}$$

Bangõs sklidìmo greĩtis lygus jos ilgio ir svyravimo dažnio sandaugai.

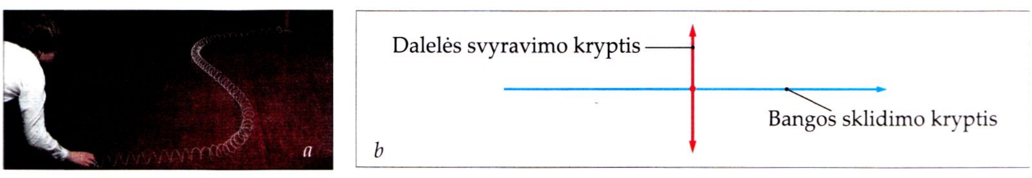
Mechaninių bangų sklidimo greitis yra baigtinis ir priklauso nuo terpės, kuria jos sklinda. Greičiausiai mechaninės bangos sklinda kietaisiais kūnais, lėčiausiai – dujomis.

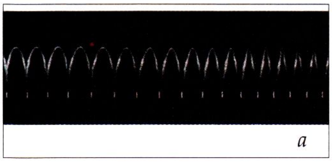
Mechaninių bangų rūšys. Bangos terpėje

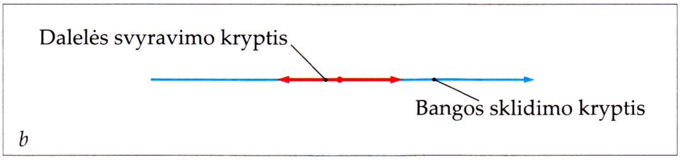
Pagal sklidimą mechaninės bangos skirstomos į ***skersinės*** ir ***išilginės***. Šias bangų rūšis galima pademonstruoti žaisliuku – spyruokle. Mechaninė banga juo sukeliama taip: spyruoklė patiesiama ant plokščio paviršiaus ir vienas jos galas įtvirtinamas, o kitas stumdomas aukštyn ir žemyn (8.6.6 pav., *a*). Šiuo atveju spyruoklės vijų poslinkis yra statmenas bangos sklidimo krypčiai: banga sklinda horizontaliai, o dalelės svyruoja vertikaliai (8.6.6 pav., *b*). ***Bangos, kurių dalelės svyruoja statmenai bangos sklidimo krypčiai, vadinamos skersìnėmis bangomìs.***

Sklindant skersinei bangai (8.6.6 pav., *a*), spyruoklė keičia savo formą: joje atsiranda iškylų (keterų) ir

8.6.6 pav.







8.6.7 pav.

įdubų, kurios bėga bangos sklidimo kryptimi. Bangos ilgis atitinka atstumą tarp dviejų gretimų iškylų (keterų) arba įdubų.

Bangą spyruoklėje galima sukelti ir kitu būdu – neįtvirtintą spyruoklės galą timpčiojant pirmyn ir atgal išilgai jos ašies. Spyruoklės vijos vienur sutankės, kitur praretės, t. y. pasislinks išilgai ašies (8.6.7 pav., *a*). Šiuo atveju tiesė, išilgai kurios svyruoja dalelės, sutampa su svyravimo sklidimo tiese (8.6.7 pav., *b*). ***Bangos, kurių dalelės svyruoja išilgai svyravimo sklidimo tiesės, vadinamos išilgìnėmis bangomìs.***

Sklindant išilginei bangai (8.6.7 pav., *a*), spyruoklė išlieka tiesi, tačiau vienur sutankėja, kitur praretėja. Išilginės bangos ilgis atitinka atstumą tarp dviejų gretimų bangos sutankėjimų arba praretėjimų, bėgančių bangos sklidimo kryptimi.

Bangai terpėje susidaryti būtina deformacija. Jeigu ji yra tempimo arba gniuždymo pasekmė, susidaro išilginės bangos. Kadangi išsitempti arba susispausti gali bet koks kūnas, tai išilginės bangos susidaro ir sklinda bet kokia terpe: dujomis, skysčiais, kietaisiais kūnais.

Sklindant skersinei bangai, atskiros sritys juda statmenai sklidimo krypčiai. Tuo metu medžiagos sluoksniai pasislenka vienas kito atžvilgiu. Dujos ir skysčiai taip pasislinkti negali, todėl skersinės bangos juose nesusidaro. Išimtis – vandens paviršius.

Bangos energija

Sklindant skersinei arba išilginei bangai, terpės dalelės perduoda poveikį viena kitai. Drauge jos perduoda ir energiją, gautą iš svyravimą sukeliančio šaltinio. Svarbiausia visų bangų savybė – pernešti energiją, nepernešant medžiagos.

Be aptartų mechaninių bangų, egzistuoja ir kitos rūšies bangos, vadinamos elektromagnètinėmis. Joms sklisti terpė nereikalinga. Su šiomis bangomis susipažinsite kitais mokslo metais.

Klausimai ir užduotys

1. Kas yra banga? Kokiomis sąlygomis sklinda mechaninės bangos?

2. Kuo banga skiriasi nuo svyravimo?

3. 8.6.8 paveiksle pavaizduota, kaip vaikai imitavo mechaninės bangos modelį. Kokią mechaninę bangą jie vaizdavo? Atsakymą pagrįskite.

4. Kokiose terpėse susidaro išilginės bangos? Atsakymą pagrįskite.

5. Kokiose terpėse susidaro skersinės bangos? Atsakymą pagrįskite.

6. Kuo panašios ir kuo skiriasi skersinės ir išilginės bangos?

7. Ant tvenkinio kranto sėdintis berniukas vandens paviršiuje sukelia bangas, periodiškai kaišiodamas lazdos galą į tvenkinį. Kaip kis vandens bangos ilgis, jei berniukas lazda baksnos dažniau; rečiau? Atsakymą pagrįskite.

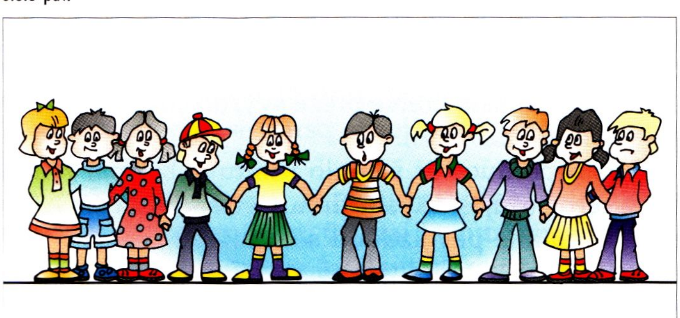
8. Ežero paviršiuje banga sklinda 6 m/s greičiu. Bangos ilgis 3 m. Kokiu dažniu svyruoja į vandenį nukritęs lapas? Koks yra jo svyravimo periodas? (2 Hz; 0,5 s)

9. 8.6.9 paveiksle pavaizduotas bangos grafikas. Ordinačių ašyje atidėtos taško nuokrypio x nuo pusiausvyros padėties vertės, abscisių ašyje – to taško nuotolis nuo pradinės padėties (bangos šaltinio). Iš grafiko nustatykite bangos ilgį ir svyravimo amplitudę.

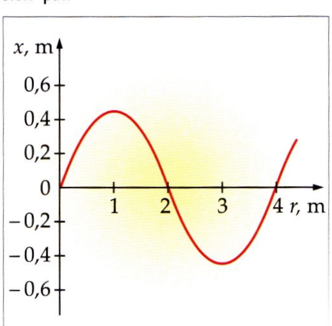
10. Žvejodamas Domantas stebėjo ežero paviršių. Berniukas suskaičiavo, kad per 6 s pro jį prabėgo 4 bangų keteros. Atstumas tarp pirmosios ir trečiosios keteros buvo lygus 12 m. Apskaičiuokite:

a) dažnį, kuriuo svyravo vandens dalelės; (0,5 Hz)
b) bangų ilgį; (6 m)
c) greitį, kuriuo sklido ežero bangos. (3 m/s)

8.6.8 pav.



8.6.9 pav.



8.7. Garsas

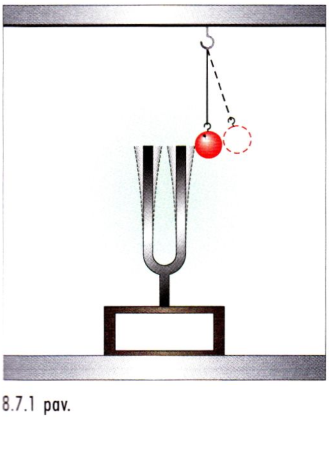
Pagrindinės sąvokos

Akùstika,
garso stìpris,
garso aũkštis,
ultragarsas,
infragarsas.

Garso atsiradimas ir sklidimas

Gamtoje ir technikoje svyravimų ir bangavimų apstu. Tačiau iš jų didelę praktinę reikšmę žmogaus gyvenime turi garsiniai svyravimai ir bangos, arba ***garsaĩ***. Kalba – vienas po kito einantys garsai. Jie yra pagrindinė mūsų bendravimo priemonė. Ausis, kuria suvokiame garso reiškinius, skiria net žmogaus balso atspalvius: džiaugsmą, pyktį, liūdesį. Antra vertus, atsispindėjusios nuo daiktų, garso bangos arba patys skambantys daiktai suteikia žinių apie mus supančią aplinką. ***Fizikos mokslo skyrius, nagrinėjantis garso reiškinius, vadinamas akùstika*** (gr. *akustikos* – girdimasis, klausomasis).

Visų garsų priežastis yra mechaniniai terpės virpesiai, nors jie paprastai nematomi. Susidūrus dviem automobiliams, jų paviršiai pradeda virpėti ir išgirstame smūgio garsą; muzika iš radijo imtuvo ar muzikos centro sklinda dėl to, kad virpa garsiakalbio membrana; kalbame ir dainuojame virpant balso stygoms gerklose.



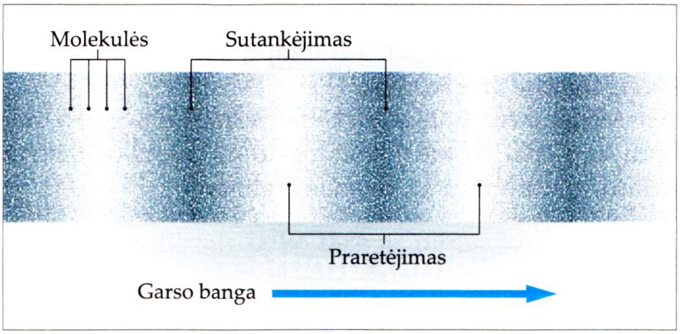
8.7.1 pav.

Kad virpantys kūnai skleidžia garsą, patvirtina bandymas. Tiriant garso reiškinius, kaip garso šaltinis dažnai naudojamas kamertònas (8.7.1 pav.). Užgautas minkštu plaktuku, jis ima skambėti. Jei prie skambančio kamertono priartinsime lengvą rutuliuką (stiklinį karoliuką), pakabintą ant siūlo, jis nuo kamertono atšoks. Palietę pirštais kamertono šakutes, tiesiogiai pajusime jų virpėjimą.

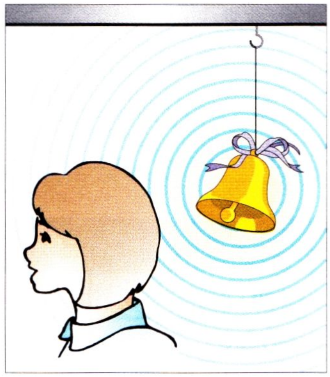
Kamertono virpesių pobūdį galime ištirti. Prie jo šakutės pritvirtinkime adatą ir perbraukime ja pastoviu greičiu per aprūkusios stiklinės plokštelės paviršių. Plokštelėje išvysime liniją, panašią į sinusoidę. Tai grafinis virpesių vaizdas – jų skleistinė laiko atžvilgiu. Panašią kreivę brėžė svyruojantis piltuvėlis su smėliu (8.2.3 pav.).

Garsui perduoti iš šaltinio į imtuvą būtinai reikalinga terpė (dujos, skystis arba kietasis kūnas). Garso plitimą galime pavaizduoti schemiškai:

Garso šaltinis → Terpė → Imtuvas (ausis)



8.7.2 pav.



8.7.3 pav.

Virpėdamas kūnas verčia svyruoti arčiausiai jo esančias oro molekules. Virpesiai sklinda oru, sudarydami garso bangą. Sklindant šiai bangai, oras kartu su ja neslenka. Ten, kur molekulės susispiečia, susidaro didesnio slėgio sritis (sutankėjimas), o kur jų lieka mažiau – mažesnio slėgio sritis (praretėjimas) (8.7.2 pav.). Pakaitomis einančios didelio ir mažo slėgio sritys sudaro garso bangą. Garso bangos yra išilginės. Garsas iš šaltinio sklinda visomis kryptimis. 8.7.3 paveiksle pavaizduota, kaip nuo skambančio varpelio į visas puses plinta garso banga.

Minkšti ir akyti kūnai yra blogi garso laidininkai. Šia kūnų savybe naudojamasi norint sumažinti triukšmą – patalpų grindys, sienos ir lubos padengiamos garsą slopinančių medžiagų tarpsluoksniais, akytomis medžiagomis.

Garso bangos plinta kietaisiais kūnais, skysčiais, dujomis, tačiau jos negali sklisti tuštumoje. Vadinasi, Mėnulyje ar kitoje beorėje erdvėje susikalbėti nepavyktų, negirdėtume pašnekovo skleidžiamų garsų.

Garso šaltiniu dažniausiai tampa labai stangrūs kūnai, kaip antai: įtempta plieninė styga, kamertonas, varpelis, metalinė liniuotė, virbalas ir pan. Tačiau juo gali būti ne tik kietieji kūnai, bet ir skysčiai bei dujos. Pavyzdžiui, vandentiekio vamzdžiuose šniokščia vanduo, dūmtraukyje ūžia oras, pučiamuosiuose muzikos instrumentuose garsą sukelia virpantis oro stulpelis.

Pagal bangos formą ir pobūdį skiriamos trys garsų rūšys: garso smūgiai, ūžesiai ir muzikiniai garsai.

- Garso smūgiai kyla šaunant, sprogstant, susiduriant automobiliams ir t. t. Šiuos garsus atitinkanti smūgio banga yra vienintelė banga.

- Ūžesius sudaro vienas paskui kitą neperiodiškai einantys garso smūgiai. Tai – lapų šlamesys, geležies žvangėjimas, girgždesys.
- Muzikinius garsus sukelia periodiniai garso šaltinių virpesiai. Tokie yra kamertono, muzikos instrumentų, dainininkų skleidžiami garsai.

Garso sklidimo greitis

Kiekviena terpe garsas plinta tam tikru greičiu. Greičiausiai jis sklinda kietaisiais kūnais, lėčiau – skysčiais ir lėčiausiai – dujomis. Skirtingą garso greitį įvairiose terpėse lemia vidinė jų sandara. Kuo tankesnė terpė, tuo didesnis garso greitis joje. Garso greitis kai kuriose 0 °C temperatūros terpėse pateikiamas lentelėje.

Garso greitis įvairiose terpėse

Terpė	Garso greitis, m/s	Terpė	Garso greitis, m/s
Oras	332	Geležis	4900
Vanduo	1450	Stiklas	5600
Varis	3800	Kamštis	430–530

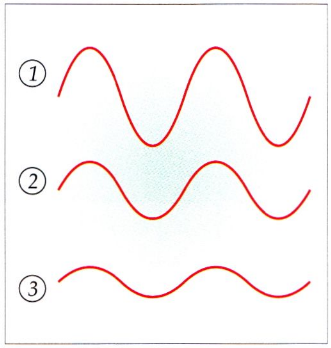
Garso greitis ore yra mažesnis nei šviesos greitis. Dėl to pirma pamatome žaibą ir tik vėliau išgirstame perkūnijos garsą, pirma pamatome blykstelėjimą, o tik paskui mus pasiekia šūvio garsas. Tikslūs garso greičio matavimai rodo, kad normaliomis sąlygomis (esant 0 °C temperatūrai ir normaliam atmosferos slėgiui) garsas oru sklinda 332 m/s greičiu. Tai gana didelis greitis, tačiau naujausi lėktuvai jau skrenda greičiau, negu sklinda garsas. Kai kurių reaktyvinių lėktuvų greitis net 6 kartus didesnis už garso greitį. Kylant oro temperatūrai, garso greitis didėja. Pavyzdžiui, esant 15 °C temperatūrai, garsas sklinda 342 m/s greičiu.

Kitose dujose garso greitis kitoks negu ore. Kuo lengvesnės dujos, tuo judresnės jų molekulės ir tuo greičiau jomis sklinda garsas. Antai 0 °C temperatūros vandenilyje garso greitis lygus 1265 m/s, o anglies diokside – 260 m/s.

Mechaninei bangai pereinant į kitą terpę, keičiasi jos sklidimo greitis ir ilgis, o dažnis lieka pastovus.

Garso stipris

Mokydamiesi mechanikos pradmenų, sužinojote, kad garso stipris yra energijos kiekis, kurį garso banga per laiko vienetą perneša pro ploto vienetą, statmeną bangos sklidimo krypčiai. Atlikdami bandymą, ištirkime, nuo ko priklauso garso stipris. Kelis kartus iš eilės tam tikrais laiko tarpais užrašykime kamertono virpesius. Grafikai (8.7.4 pav.) rodo, kad skirtingais laiko momentais kamertono virpesių periodas nepakinta: visų grafikų iškylos ir įdubos sutampa. Kad kamertono garsas pamažėle slopsta, rodo virpesių amplitudė. Stipriausio garso amplitudė yra didžiausia (*1* grafikas), vos girdimo – maža (*3* grafikas). Vadinasi, ***garso stipris priklauso nuo virpesių amplitudės.***



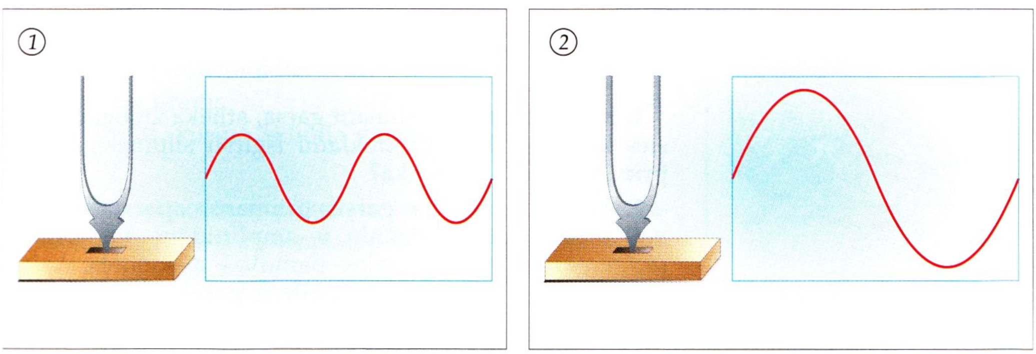
8.7.4 pav.

Skambančio kamertono amplitudės mažėjimą paaiškina energijos tvermės dėsnis. Virpantis kamertonas priverčia virpėti gretimas oro daleles ir atiduoda joms dalį savo energijos. Kamertono energijos atsargos mažėja, dėl to mažėja jo virpesių amplitudė, silpnėja garsas.

Garso aukštis

Garso aukštis susijęs su virpesių dažniu. Tai patvirtina bandymas su dviem skirtingo aukščio garsus skleidžiančiais kamertonais. Užrašomi jų virpesiai (8.7.5 pav.). Pirmoji kreivė yra kamertono, skleidžiančio aukštą garsą, antroji – skleidžiančio žemą garsą. Pirmojo kamertono virpesių periodas yra mažesnis, taigi jo dažnis didesnis negu antrojo kamertono. Vadinasi, ***garso aukštis priklauso nuo virpesių dažnio.*** Didelio dažnio garsai yra aukšti, mažo – žemi. Mūsų suvokiamas garso aukštis šiek tiek priklauso nuo jo

8.7.5 pav.



stiprio: to paties dažnio stipresnis garsas atrodo žemesnis už silpnesnį.

Žmogaus ausis girdi garsus, kurių dažnis – nuo 16 Hz iki 20 000 Hz. Žmogaus balso ribos yra tarp 64 Hz (žemoji boso gaida) ir 1300 Hz (aukštoji soprano gaida). Vis dėlto žmogus suvokia ne visus garsus. Negirdimojo garso bangos jo ausį pasiekia, veikia jos būgnelį, tačiau garso pojūčio nesukelia.

Garsų rūšys

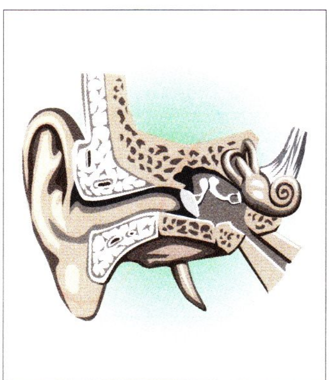
Šiuolaikinės technologijos leidžia sukurti ultragarsus, kurių dažnis siekia kelis šimtus megahercų. Intensyvioms ultragarso bangoms gauti naudojami kristalai (turmalino, kvarco), elektriniame lauke keičiantys matmenis: susitraukiantys arba ištįstantys, nelygu kokia yra lauko kryptis. ***Garsas, kurio dažnis didesnis už girdimo garso ribą, vadinamas ultragarsù.*** Jis turi stiprų biologinį poveikį. Ultragarsas gali sunaikinti mikrobus, dėl to jis naudojamas sterilizuojant pieną, kitus produktus. Ultragarsu paveikus sėklas, padidėja jų daigumas.

Ultragarsas naudojamas ir technikoje. Juo metalo dirbiniuose ieškoma įvairių defektų (ultragarsinė defektoskopija), matuojamas jūros gylis, tiriamas vandenyno dugnas, aptinkami žuvų telkiniai (hidroakustika), nustatomas atstumas iki kliūties.

Medicinoje ultragarsas naudojamas ligoms diagnozuoti ir gydyti. Tobulus ultragarso lokatorius turi delfinai bei šikšnosparniai. Jie padeda delfinams gerai orientuotis drumstame vandenyje, o šikšnosparniams – tamsoje.

Garsas, kurio dažnis mažesnis už girdimo garso ribą, vadinamas infragarsù. Infragarsas sukelia pykinimą, galvos svaigimą, gali atsirasti kitų fiziologinių pokyčių.

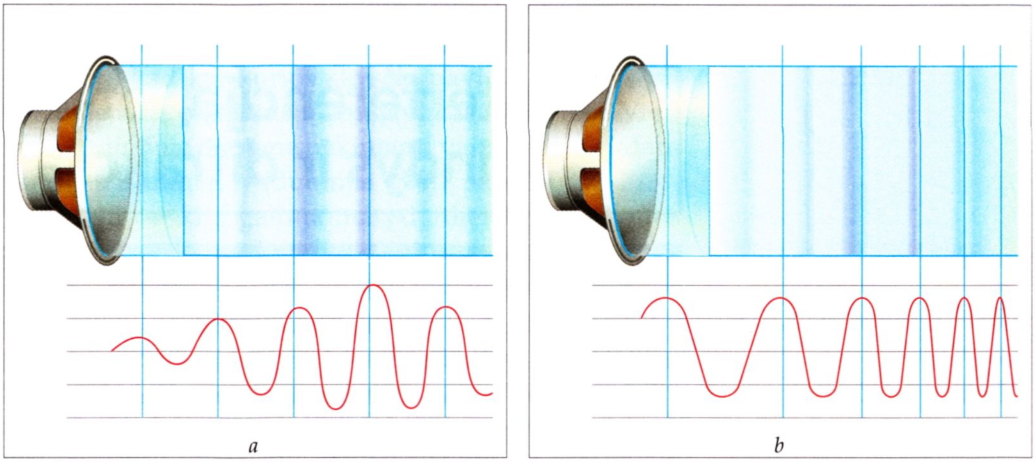
8.7.6 pav.



Klausimai ir užduotys

1. Kokį vaidmenį, priimant garsą, atlieka žmogaus ausies kaušelis? Kodėl, norėdami išgirsti silpnus garsus, prie jo pridedame ranką?

2. Ausis – sudėtingas garsus priimantis aparatas, kuris veikia labai plačiu dažnių ir amplitudžių diapazonu (8.7.6 pav.). Per biologijos pamokas aiškinotės, kaip ausis suvokia garsą. Prisiminkite ir parašykite, kaip tai vyksta.



8.7.7 pav.

3. 8.7.7 paveiksle, *a* ir *b*, pavaizduota garso banga. Kreivė apačioje rodo slėgio kitimą laikui bėgant. Naudodamiesi paveikslais, atsakykite į šiuos klausimus:

a) ar kito garso aukštis (atsakymą pagrįskite);

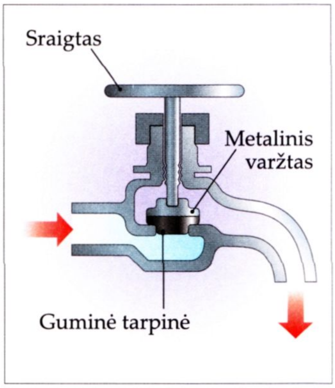
b) ar kito garso stipris (atsakymą pagrįskite)?

4. 8.7.8 paveiksle pavaizduota supaprastinta vandens čiaupo schema. Remdamiesi piešiniu, paaiškinkite:

a) kaip veikia vandens čiaupas;

b) kodėl pradeda gausti senesni vandentiekio vamzdžiai.

8.7.8 pav.



5. Kiek kartų pakinta perėjusios iš oro į vandenį garso bangos ilgis? Garso greitis vandenyje 1435 m/s, garso greitis ore 340 m/s. (4,2 karto)

6. Vertikaliai aukštyn paleista signalinė raketa sprogo po 3 s nuo paleidimo momento, o žmogus išgirdo sprogimo garsą, praėjus 0,3 s po sprogimo. Garso greitis buvo lygus 332 m/s. Apskaičiuokite:

a) į kokį aukštį pakilo raketa; (į 99,6 m aukštį)

b) kokiu vidutiniu greičiu ji kilo. (33,2 m/s)

7. Garso greitis prieš vėją lygus 310 m/s, pavėjui – 370 m/s. Apskaičiuokite:

a) vėjo greitį; (30 m/s)

b) greitį, kuriuo sklinda garsas, kai vėjo nėra. (340 m/s)

8. Jeigu styginis muzikos instrumentas skleidžia žemesnį toną, jo styga įtempiama labiau. Paaiškinkite, kodėl taip pavyksta stygą suderinti su reikiamu virpesių dažniu.

8.8. Mechaninių bangų interferencija, atspindys ir difrakcija

! Pagrindinės sąvokos

Bangų̃ superpozìcijos prìncipas, kohereñtinės bañgos, bangų̃ interfereñcija, bangų̃ atspindỹs, kritìmo kam̃pas, ãtspindžio kam̃pas, bangų̃ difrãkcija.

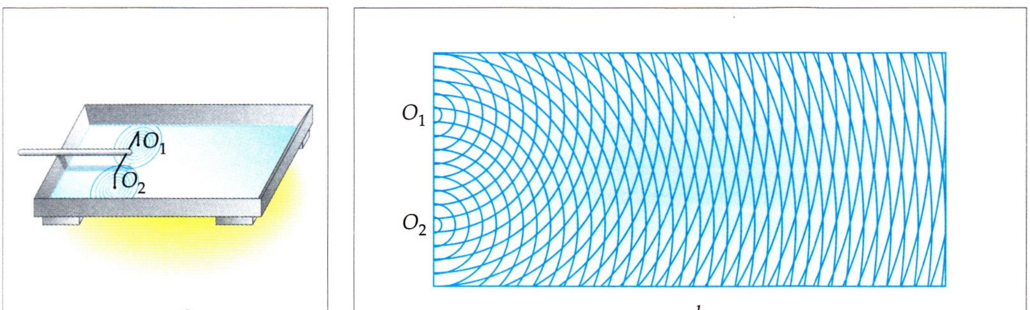
Bangų interferencija

Anksčiau aptarėme mechaninių bangų atsiradimą ir sklidimą. Nagrinėdami bangavimą, apsiribojome viena banga. Tačiau mus supančioje aplinkoje sunku aptikti tik vieną sklindančią mechaninę bangą. Dažniausiai jų būna kelios. Stebėjimai ir bandymai rodo, kad susitikusios mechaninės bangos užplaukia viena ant kitos ir prasilenkia. Toliau jos sklinda taip pat kaip iki susitikimo. Į ramų tvenkinį vienu metu įmetę du akmenukus, pamatysime, kad nuo kiekvieno iš jų pradeda sklisti bangos. Jos susitinka, prasilenkia ir bėga toliau. Mėtant akmenukus, tvenkinio paviršiuje susidaro netaisyklingas „bėgantis" iškylų ir įdubų vaizdas.

Garso bangos nesąveikauja ir netrukdo viena kitai. Pavyzdžiui, grojant orkestrui, kiekvieno instrumento garsai mus pasiekia nepakitę. Mes galime girdėti ir smuiko, ir klarneto, ir būgno skleidžiamus garsus. Kalbėdamiesi su draugais, girdime ne tik jų kalbą, bet ir uždaromų durų trinktelėjimą, šuns lojimą.

Norėdami detaliau išnagrinėti, kas vyksta dviejų bangų susitikimo vietoje, atlikime bandymą. Jam panaudokime vonelę, pripiltą vandens, ir du mažus rutuliukus O_1 ir O_2, pritvirtintus prie harmoningai svyruojančio strypo. Kai rutuliukai pasiekia vandens pa-

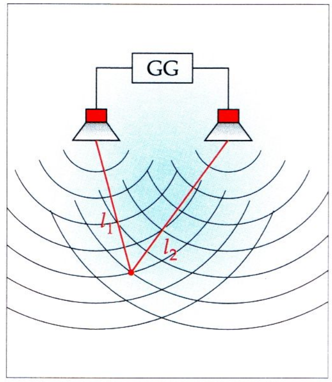
8.8.1 pav.



a *b*

viršių, nuo jų pradeda sklisti dvi bangos (8.8.1 pav., *a*). Atidžiau įsižiūrėjus į bangų sklidimo sritis, nesunku pastebėti, kad kai kurios skysčio paviršiaus dalys visiškai nejuda, o kai kurių bangavimas sustiprėja. Vandens paviršiuje matome nekintantį vaizdą, kurį sudaro vandens iškilimai ir įdubimai (8.8.1 pav., *b*).

Panašų reiškinį galima matyti atliekant bandymus su garso bangomis. Du dinaminius garsiakalbius pritvirtinkime prie vieno garso šaltinio generatoriaus (8.8.2 pav.). Vaikščiodami nedideliais atstumais po patalpą, iš klausos galime nustatyti, kad vienose vietose garsas yra stipresnis, kitose – silpnesnis. Vadinasi, iš dviejų šaltinių sklindančios bangos vienuose erdvės taškuose viena kitą stiprina, kituose – silpnina. Kodėl?



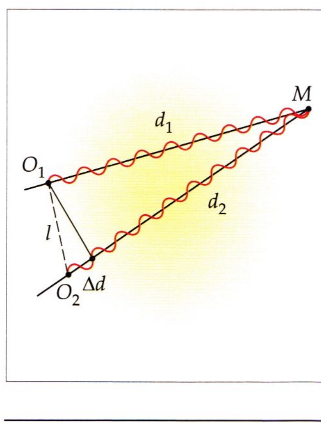
8.8.2 pav.

Bangos juda nepriklausomai viena nuo kitos, nesąveikaudamos. Per tą patį tašką einančioms bangoms galioja ***superpozìcijos***, arba ***sudėtiẽs, prìncipas***: ***jei dvi ar daugiau bangų juda toje pačioje vietoje, tai jų atstojamoji gaunama sudedant atskiras bangas.*** Kai susideda dvi visai vienodų šaltinių skleidžiamos bangos, vandens paviršiuje susidaro pastovus banguojančių ir nebanguojančių vandens sričių vaizdas. Jis vadinamas ***interfereñciniu vaizdù*** (lot. *inter* – tarp, *ferens* – nešantis). Susidėjus vieno šaltinio garso bangoms, susidaro stipresnio ir silpnesnio garso sritys – vyksta garso bangų interferencija. ***Dviejų (arba daugiau) bangų sudėtis, kai kiekviename erdvės taške atstojamojo svyravimo amplitudė laikui bėgant nekinta, vadinama bangų̃ interfereñcija.***

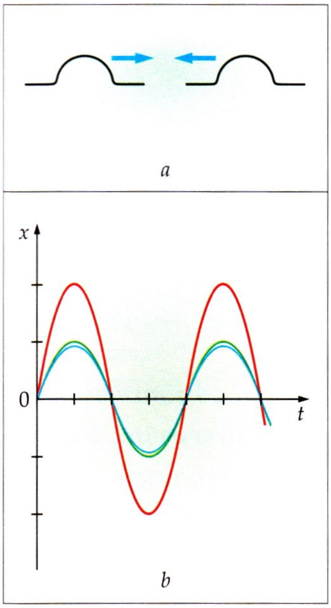
Kaip jau minėjome, interferencija įmanoma tik tada, kai bangas skleidžia visiškai vienodi šaltiniai. Jie vadinami ***kohereñtiniais*** (lot. *cohaerens* – susijęs). Koherentiniai šaltiniai svyruoja vienodu dažniu ir sinchroniškai (virpesių fazės sutampa) arba išlaiko pastovų fazių skirtumą. Koherentinių šaltinių skleidžiamos bangos vadinamos ***kohereñtinėmis bangomìs***.

Interferencijos maksimumų ir minimumų sąlygos

8.8.3 pav.



Koherentinių šaltinių O_1 ir O_2 skleidžiamos bangos susitinka taške M, nuėjusios nevienodą kelią d_1 ir d_2 (8.8.3 pav.). Kai bangų eigos skirtumas $\Delta d = d_2 - d_1$



8.8.4 pav.

lygus bangos ilgiui, antroji banga vėluoja, palyginti su pirmąja, vienu periodu. Tada bangų keteros ir įdubos sutampa (8.8.4 pav., *a*). 8.8.4 paveiksle, *b*, pavaizduota dviejų bangų sukeltų poslinkių x_1 ir x_2 priklausomybė nuo laiko, kai bangų eigos skirtumas lygus bangos ilgiui λ. Atstojamojo svyravimo amplitudė yra dvigubai didesnė už vienos bangos amplitudę, taigi svyravimas vandens paviršiuje sustiprėja.

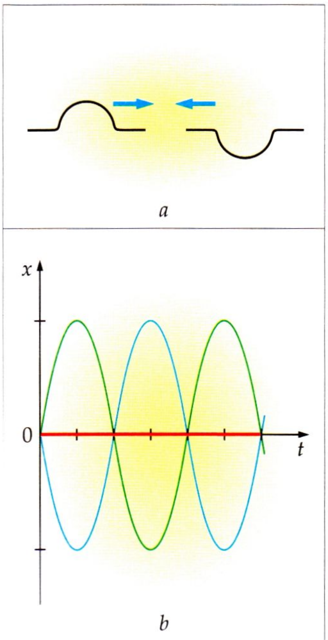
Kai dviejų bangų, sukeliančių svyravimą, eigos skirtumas tam tikrame taške lygus sveikam bangų ilgių skaičiui, terpės svyravimo amplitudė tame taške yra didžiausia. Taigi interferencijos maksimumo sąlyga yra tokia:

$$\Delta d = k\lambda;\ \text{čia}\ k = 0, 1, 2, \ldots \qquad (8.26)$$

Sakykime, nuėjusių nevienodą kelią d_1 ir d_2 bangų eigos skirtumas Δd lygus pusei bangos ilgio. Šiuo atveju vienos bangos ketera susitinka su kitos įduba (8.8.5 pav., *a*). Atstojamojo svyravimo amplitudė x lygi nuliui ir nagrinėjamame taške svyravimų nėra (8.8.5 pav., *b*). Tokį patį rezultatą gausime, kai bangų eigos skirtumas bus lygus nelyginiam pusbangių skaičiui, t. y. kai

$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2};\ \text{čia}\ k = 0, 1, 2, \ldots \qquad (8.27)$$

8.8.5 pav.



Vadinasi, ***kai dviejų bangų, sukeliančių svyravimą, eigos skirtumas tam tikrame taške lygus nelyginiam pusbangių skaičiui, terpės svyravimo amplitudė tame taške yra mažiausia.***

Bangos turi energijos. Dėl interferencijos ji pasiskirsto ne tolygiai po visas terpės daleles, o susikoncentruoja maksimumuose. Vykstant bangų interferencijai, svyravimo energija persiskirsto erdvėje, tačiau energijos tvermės dėsnis galioja.

Bangų atspindys

Susidūrusios su kliūtimi, mechaninės bangos nuo jos atsispindi. Garso atspindį nagrinėja speciali techninė disciplina – architektū̃rinė akùstika. Galima stebėti ***bangų̃ ãtspindį*** vandenyje (8.8.6 pav.).

Atsispindėjusios bangos atsiradimą dar XVII a. paaiškino olandų fizikas ir matematikas Kristianas Heigensas. Jis įrodė, kad ***kiekvienas terpės taškas, kurį pasiekia bangavimas, pats virsta svyravimo šaltiniu***. Jeigu žinome bangos fronto padėtį laiko momentu t, galime numatyti jo padėtį laiko momentu $t + \Delta t$, tardami, kad kiekvienos bangos fronto taškas yra antrinių bangų šaltinis (8.8.7 pav.).

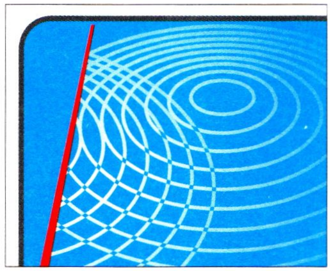
Remiantis Heigenso principu, nesunku paaiškinti, kaip atsispindi mechaninė banga. Pavaizduokime plokščiąją bangą, krintančią į plokščiąjį paviršių MN (8.8.8 pav.). A_1A ir B_1B yra du lygiagretūs šios bangos spinduliai, o plokštuma AC – bangos frontas. Kampas α tarp krintančiojo spindulio ir iš kritimo taško A iškelto statmens atspindinčiam paviršiui vadinamas ***krìtimo kampù***.

Sklindant bangai, atskiros jos fronto AC dalys pasieks atspindinčią ribą AB ne vienu metu. Svyravimas taške A prasidės anksčiau negu taške B. Kai krintančioji banga ateis iki taško B, iš taško A sklindanti antrinė banga bus pusrutulio, kurio spindulys $R = AD$, formos. Kitų antrinių bangų, sužadintų tarp taškų A ir B, frontai bus tokie, kokie pavaizduoti 8.8.8 paveiksle. Šiuos bangų frontus liečianti plokštuma BD yra atsispindėjusios bangos frontas. Atsispindėję spinduliai AA_2 ir BB_2 statmeni plokštumai BD. Kampas β tarp statmens atspindinčiam paviršiui ir atsispindėjusio spindulio vadinamas ***ãtspindžio kampù***.

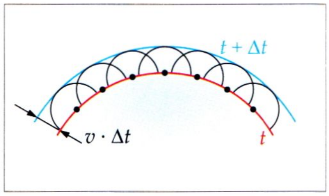
Iš 8.8.8 paveikslo matyti, kad statieji trikampiai ADB ir ACB yra lygūs, nes turi po dvi lygias kraštines: kraštinė AB yra bendra, o $AD = CB = vt$; čia v – bangos sklidimo greitis. Todėl $\angle DBA = \angle CAB$. Kadangi kampai su atitinkamai statmenomis kraštinėmis yra lygūs, tai $\alpha = \angle CAB$, o $\beta = \angle DBA$. Vadinasi, ***banga atsispindi tokiu pat kampu, kokiu krito***:

$$\beta = \alpha. \qquad (8.28)$$

Be to, remiantis Heigenso teorija, įrodoma, kad ***krintantysis spindulys, atsispindėjęs spindulys ir statmuo, iškeltas iš kritimo taško, yra vienoje plokštumoje***. Šie du teiginiai yra jau iš pagrindinės mokyklos jums žinomas bangų atspindžio dėsnis.

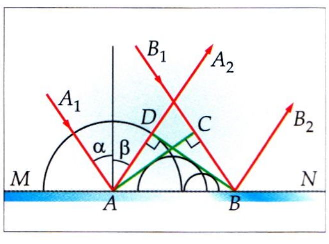


8.8.6 pav.



8.8.7 pav.

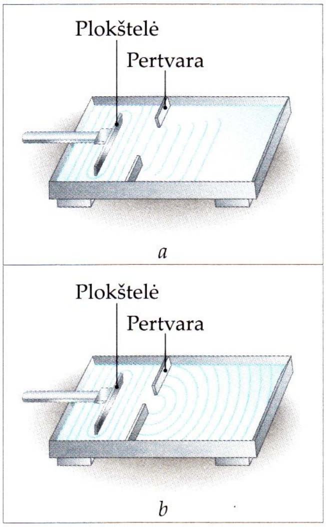
8.8.8 pav.



Bangų difrakcija

Mechaninės bangos užlinksta už kliūčių, pavyzdžiui, vandens bangos apeina ežere augančių nendrių stiebus, tiltelio pastolius, garso bangos – medžių kamienus, nedidelius statinius, baldus, dėl to už koridoriaus posūkio galime girdėti draugų balsus, miške – grybautojų kalbą. Taigi bangos gali nukrypti nuo tiesaus kelio. ***Bangų nukrypimas nuo tiesaus kelio, kliūčių aplenkimas vadinamas bangų̃ difrãkcija*** (lot. *difractus* – sulaužytas). Difrakcija, kaip ir interferencija, būdinga kiekvienam bangavimui.

Žinant Heigenso principą, nesunku suprasti, kodėl bangos užlinksta už kliūties. Taip yra dėl to, kad terpės dalelių skleidžiamos antrinės bangos prasiskverbia už kliūties kraštų.

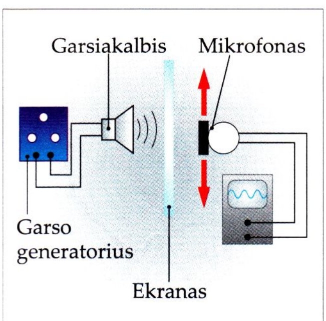


8.8.9 pav.

Vis dėlto bangos užlinksta ne visada. Pavyzdžiui, vandens bangos nesklinda už didelio akmens ežere ar salos. Kas lemia mechaninių bangų difrakciją?

Atlikime bandymą. Į bangų vonelę pripilkime vandens ir įstatykime pertvarą su plyšiu (8.8.9 pav.). Judindami plokštelę, vandenyje sukelkime bangas. Jei plyšys bus didelis, banga pro jį praeis beveik nekeisdama savo formos, tiktai pakraščiuose šiek tiek užlinks už pertvaros (8.8.9 pav., *a*). Dabar į vonelę įstatykime kitą pertvarą su mažesniu plyšiu ir vėl sužadinkime bangą. Ji labai gerai užlinks už plyšio kraštų (8.8.9 pav., *b*). Atrodys tarsi pertvaros plyšio vietoje būtų padėtas virpantis kūnas, kuris sukelia bangas. Taigi bangų difrakcija priklauso nuo plyšio matmenų ir bangos ilgio. Kuo plyšio matmenys artimesni bangos ilgiui, tuo ryškesnė difrakcija.

8.8.10 pav.



Ar garso bangų difrakcija taip pat priklauso nuo kliūties matmenų? Atlikime kitą bandymą. Prie garso generatoriaus prijunkime garsiakalbį ir garso bangų kelyje pastatykime ekraną (8.8.10 pav.). Mikrofoną sujunkime su oscilografù – prietaisu elektriniams virpesiams stebėti. Stumdydami mikrofoną, galime girdėti, kad garso bangos sklinda ir už ekrano kraštų. Padidinus garso bangų dažnį, o kartu ir jų ilgį, difrakcija bus ryškesnė.

Difrakcija vyksta, kai bangos sutinka bet kurios formos ir matmenų kliūtis. Jeigu kliūties arba plyšio matmenys dideli, palyginti su bangos ilgiu, difrakcija mažai pastebima, jeigu prilygsta bangos ilgiui, ji yra labai ryški.

Klausimai ir užduotys

1. Kokios bangos vadinamos koherentinėmis?

2. Kas yra bangų interferencija?

3. Nurodykite, kokiomis sąlygomis susidaro interferencijos maksimumas.

4. Nurodykite, kokiomis sąlygomis susidaro interferencijos minimumas.

5. Paaiškinkite, kaip pasiskirsto svyravimo energija vykstant interferencijai.

6. Prie virpesių generatoriaus pritvirtinti du vienodi garsiakalbiai skleidžia bangas. Jos patenka į mikrofoną, prijungtą prie oscilografo. Remdamiesi šia informacija, atsakykite į klausimus:

a) kas yra garso banga;

b) iš ko sudarytas mikrofonas;

c) kaip mikrofonas paverčia garso bangas žemojo dažnio elektros srove;

d) ką matysime oscilografo ekrane, jei bangos iki mikrofono nueis vienodą atstumą (atsakymą pagrįskite);

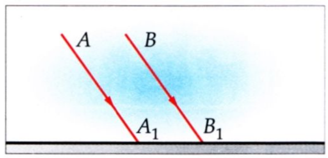
e) ką rodytų oscilografas, jei garsiakalbius prijungtume prie skirtingo dažnio virpesių generatorių (atsakymą pagrįskite)?

7. Dviejų rutuliukų svyravimo periodas 0,5 s, o bangos sklidimo greitis 0,1 m/s. Ką matysime bangų susitikimo vietoje, kai jų eigos skirtumas bus lygus 5 cm; 7,5 cm; 10 cm?

8. 8.8.11 paveiksle pavaizduoti du plokščiosios bangos, krintančios į paviršių, spinduliai AA_1 ir BB_1.

a) Persibraižę brėžinį savo sąsiuvinyje, pavaizduokite krintančiosios bangos frontą.

b) Pavaizduokite nuo paviršiaus atsispindėjusios bangos frontą.



8.8.11 pav.

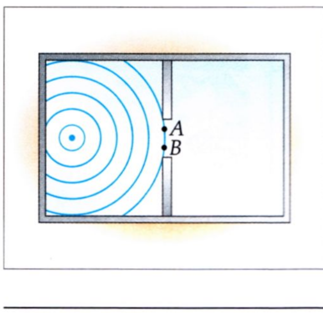
9. 8.8.12 paveiksle pavaizduotas pro plyšį einančios bangos frontas momentu t.

a) Persibraižykite brėžinį savo sąsiuvinyje ir pavaizduokite antrines bangas, sklindančias nuo taškais A ir B pažymėtų šaltinių.

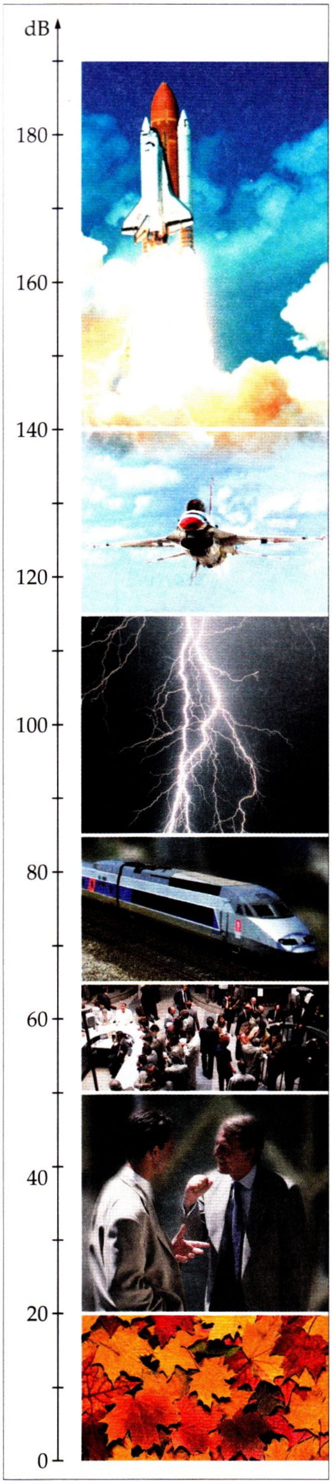
b) Pavaizduokite bangos fronto padėtį momentu $t + \Delta t$.

c) Paaiškinkite, kodėl banga užlinksta už kliūties kraštų.

8.8.12 pav.



8.9. Triukšmas. Jo poveikis ir mažinimo būdai



8.9.1 pav.

Mus supančioje aplinkoje dažnai girdime muziką, triukšmą. Pavyzdžiui, mokykloje per pertraukas girdime triukšmą, per muzikos pamokas klausomės muzikos. Muzikìniai garsaĩ ir triùkšmas skirtingai veikia žmogų. Muzika nuteikia žvaliai, ramina, triukšmas vargina. Kas yra muzikiniai garsai, o kas – triukšmas?

Harmoningai svyruojančio kūno sukeliamas garsas vadinamas muzikiniù garsù, arba tonù. Gryną toną galima išgauti kamertonu. Fizikiniu požiūriu triukšmas nuo muzikinio garso skiriasi tuo, kad triukšmui nebūdingas apibrėžtas virpesių dažnis, taigi ir garso aukštis. Triukšmą sudaro skirtingų amplitudžių ir įvairaus dažnio virpesiai.

Pagrindiniai triukšmo šaltiniai yra transportas, pramonės įmonės, statybos darbai, ventiliacijos įrenginiai, šventiniai renginiai, taip pat buitiniai prietaisai: televizoriai, muzikos centrai, muzikos instrumentai, veikiantys dulkių siurbliai, skalbimo mašinos ir t. t.

Nagrinėjant triukšmo poveikį, tenka atsižvelgti į šiuos garsą apibūdinančius dydžius: garso stiprį ir garsį (garsumą). Pirmąjį jų ką tik aptarėme, o antrąjį prisimenate iš pagrindinės mokyklos kurso. Garso stiprį, kaip žinome, lemia virpesių amplitudė. Žmogaus ausies jautrumas priklauso nuo garso dažnio. Vienodos amplitudės, bet skirtingo dažnio virpesiai neatrodo vienodai stiprūs. Žmogaus ausis jautriausia virpesiams, kurių dažnis yra apie 3500 Hz. Klausos organais suvokiamo garso pojūtį apibūdina garsis, matuojamas *bèlais* (sutrumpintai žymima B). Praktikoje dažniau vartojamas dešimtį kartų mažesnis vienetas – *decibèlas*: 1 dB = 0,1 B. Silpniausias, vos girdimas, yra 0 dB garsas (girdos slenkstis). Jo stipris lygus 10^{-12} W/m^2. Garso stiprio ir garsio ryšys nustatytas pasirinkus 1000 Hz dažnio garsą. Sudarant garsio skalę (8.9.1 pav.), buvo priimta prielaida, kad, garso stipriui padidėjus 10 kartų, garsis padidėja 10 dB. Garsio skalė, kurioje nurodytas garsis netoli šaltinių, nusako žmogaus girdimų garsų garsio diapazoną.

Koks triukšmas yra mus supančioje aplinkoje? Europos Sąjungos (ES) Žaliojoje knygoje apie triukšmo politiką (*Green Paper on future noice policy*) rašoma, kad apie 20 %, t. y. 80 mln., ES gyventojų kenčia dėl sveikatai nepriimtino triukšmo. Naujausi moksliniai tyrinėjimai rodo, kad triukšmas kenkia sveikatai, kai jis yra didesnis už 65 dB dieną ir 55 dB naktį. Pasaulio sveikatos organizacija nurodo šiuos triukšmo sukeltus padarinius:

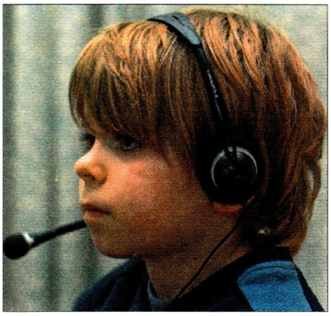
1. Triukšmas pažeidžia žmogaus klausą. Kai garsas labai stiprus, iškyla pavojus sveikatai, žmogus dėl to gali iš karto apkursti: suaugusieji – kai triukšmas didesnis kaip 140 dB, vaikai – kai 120 dB.
2. Triukšmas skatina streso hormonų išsiskyrimą. Dėl to gali sumažėti imunitetas, vystytis širdies ir kraujagyslių bei virškinamojo trakto ligos.
3. Triukšmas turi įtakos kalbos suvokimui ir neigiamai veikia mokymosi procesą. Kai triukšmas aplinkoje yra apie 35 dB, kalba ramiu tonu suvokiama puikiai, o kai 45 dB – tik gerai.

Koks triukšmas yra mokyklose? Vilniaus visuomenės sveikatos centras 2002 m. matavo triukšmo lygį 15-os mokyklų klasėse, kurių langai yra į gatvę. Nustatyta, kad triukšmas jose siekė 44–61 dB. Amerikos akustikų draugijos tyrimų duomenimis, net 25 % informacijos, perduodamos per pamokas, neįsimenama dėl aplinkos triukšmo.

Muzika yra neatsiejama mūsų gyvenimo dalis. Bet jeigu per garsios muzikos klausomasi nuolat, klausa gali negrįžtamai susilpnėti. Ją pažeidžia nuolat veikiantis 85 dB ir stipresnis garsas. Garso ir televizijos įranga, muzikos instrumentai gali skleisti daug didesnį nei saugus garsą: buitiniai televizoriai, radijas – 70–95 dB, asmeninės stereosistemos su ausinukais – 95–110 dB, roko muzikos koncertai – 110–120 dB, naujos stereosistemos – iki 140 dB. Moksliniai tyrimai rodo, kad 37 % roko ir 52 % klasikinės muzikos muzikantų kenčia dėl nusilpusios klausos.

Klausantis per trankios muzikos, išryškėja šie požymiai:

- skambėjimas ar zvimbimas ausyse pasiklausius muzikos;
- išėjus iš patalpos, kurioje skambėjo garsi muzika, atrodo, kad kiti kalba prislopintu balsu;
- sunkiai suprantama kitų kalba: girdimi visi žodžiai, bet negalima jų suprasti.



8.9.2 pav.

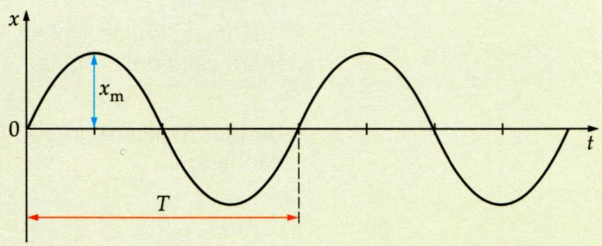
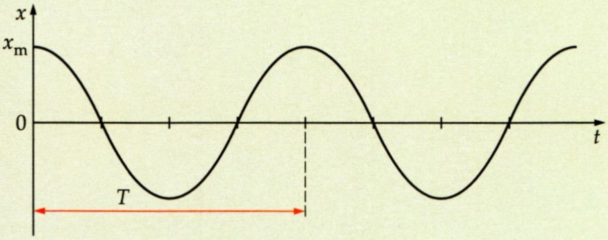
Mokiniai mėgsta klausytis muzikos, naudodami ausinukus (8.9.2 pav.). Jų keliamas triukšmas gali siekti iki 110 dB, jei klausomasi visu garsu. Kuo didesnis triukšmas, tuo mažiau laiko reikia klausai pažeisti: siekiant išvengti ūminio klausos sutrikimo, garsis ausinukuose turi būti ne didesnis kaip 110 dB. Klausa nesutriks, jei, kasdien klausantis muzikos iki 1 valandos, garsis bus ne didesnis kaip 85 dB, o klausantis ilgesnį laiką – 70 dB.

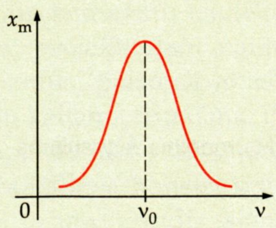
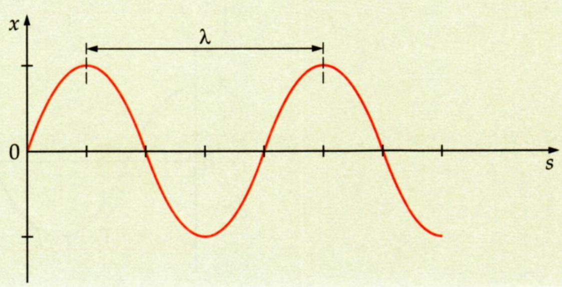
Naudojant ausinukus, reikia laikytis kai kurių taisyklių:

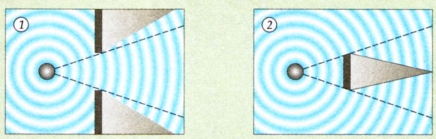
1. Niekada nebandyti garsu ausinukuose blokuoti išorinio triukšmo.
2. Nenaudoti kitų stereosistemų ausinių.
3. Riboti klausymosi trukmę.
4. Jei, nusiėmus ausines, girdėti bet koks skambesys arba kitų žmonių kalba atrodo prislopinta, reikia atsisakyti ausinių ir pasitikrinti klausą pas gydytoją.
5. Nepamiršti, kad net ir nekenksmingas klausai triukšmas gali erzinti aplinkinius, trukdyti jiems miegoti ir ilsėtis.

Inžinieriai akustikai tiria, kaip sumažinti triukšmą ir pagerinti garso kokybę. Jei, projektuojant naujus namus, konstruojant mechanizmus, paisoma akustikos dėsnių, galima sumažinti jų keliamą triukšmą. Pastatus galima suprojektuoti taip, kad juose sklistų kuo mažiau nereikalingų garsų. Metalinės konstrukcijos sklaido garsą po visą pastatą, tačiau, grindis, sienas ir lubas išklojus minkštomis garsą sugeriančiomis medžiagomis, labai sumažėja garsų, sklindančių į jas, stipris.

Skyriaus „Mechaniniai svyravimai ir bangos“ apibendrinimas

Mechaninis svyravimas	Mechaniniu svyravimu vadinamas laikui bėgant periodiškai pasikartojantis kūno judėjimas ta pačia trajektorija pusiausvyros padėties atžvilgiu. Mechaninis svyravimas gali būti laisvasis (slopinamasis) ir priverstinis (neslopinamasis).
Mechaninį svyravimą apibūdinantys dydžiai	• Svyravimo amplitudė x_m – didžiausias atstumas, kuriuo svyruojantis kūnas nutolsta nuo pusiausvyros padėties. $[x_m] = 1$ m. • Savasis svyravimo dažnis ν – svyravimų skaičius per vieną sekundę. $[\nu] = 1$ Hz $= 1$ s^{-1}. • Svyravimo periodas T – laiko tarpas, per kurį kūnas susvyruoja vieną kartą. $[T] = 1$ s. • Matematinės svyruoklės svyravimo periodas $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. • Spyruoklinės svyruoklės svyravimo periodas $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.
Harmoninis svyravimas	Harmoniniu svyravimu vadinamas nuo laiko priklausantis fizikinio dydžio periodiškas kitimas pagal sinuso arba kosinuso dėsnį $x = x_m \sin(\omega t)$ arba $x = x_m \cos(\omega t)$; čia $\omega = \frac{2\pi}{T}$.  

Svyravimo fazė	Fizikinis dydis, apibūdinantis svyruojančio kūno padėtį bet kuriuo laiko momentu, vadinamas svyravimo faze: $\varphi = \frac{2\pi}{T}.$
Harmoningai svyruojančio kūno greitis ir pagreitis	Harmoningai svyruojančio kūno greitis kinta harmoningai. Greičio fazė pasislinkusi koordinatės ($x = x_m \cos(\omega t)$) fazės atžvilgiu per $\frac{\pi}{2}$: $v_x = \omega x_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$; $v_m = \omega x_m$ – greičio amplitudė. Harmoningai svyruojančio kūno pagreitis kinta taip pat harmoningai. Pagreičio fazė pasislinkusi koordinatės fazės atžvilgiu per π: $a_x = \omega^2 x_m \cos(\omega t + \pi)$; čia $a_m = \omega^2 x_m$ – pagreičio amplitudė.
Mechaninio svyravimo energija	• Matematinės svyruoklės pilnutinė mechaninė energija $E = \frac{mv^2}{2} + mgh = mgh_m.$ • Spyruoklinės svyruoklės pilnutinė mechaninė energija $E = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}.$
Mechaninis rezonansas	Reiškinys, kurio metu išorinės jėgos kitimo dažnis ν sutampa su kūno savuoju svyravimo dažniu ν_0 ir dėl to kūno priverstinio svyravimo amplitudė labai padidėja, vadinamas mechaniniu rezonansu. 
Mechaninė banga	Svyravimo sklidimas terpe laikui bėgant vadinamas mechanine banga. • Atstumas, kuriuo išplinta svyravimas per laiko tarpą, lygų vienam periodui, vadinamas bangos ilgiu: $\lambda = vT.$ • Bangos sklidimo greitis lygus jos ilgio ir svyravimo dažnio sandaugai: $v = \lambda\nu.$ 

Mechaninių bangų interferencija	Dviejų (arba daugiau) koherentinių bangų sudėtis, kai kiekviename erdvės taške atstojamojo svyravimo amplitudė laikui bėgant nekinta, vadinama bangų interferencija. • Interferencijos maksimumų sąlyga: terpės svyravimo amplitudė tam tikrame taške yra didžiausia, kai dviejų bangų, sukeliančių svyravimą, eigos skirtumas tame taške lygus sveikam bangų ilgių skaičiui, t. y. kai $\Delta d = k\lambda$; čia $k = 0, 1, 2, ...$ • Interferencijos minimumų sąlyga: terpės svyravimo amplitudė tam tikrame taške yra mažiausia, kai dviejų bangų, sukeliančių svyravimą, eigos skirtumas tame taške lygus nelyginiam pusbangių skaičiui, t. y. kai $\Delta d = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$; čia $k = 0, 1, 2, ...$
Mechaninių bangų atspindys	Mechaninių bangų atspindžio dėsnis: • banga nuo paviršiaus atsispindi tokiu pat kampu, kokiu krito; • krintantysis spindulys, atsispindėjęs spindulys ir statmuo, iškeltas iš kritimo taško, yra vienoje plokštumoje.
Mechaninių bangų difrakcija	Bangų nukrypimas nuo tiesaus kelio, kliūčių aplenkimas vadinamas bangų difrakcija. Bangų difrakcija priklauso nuo kliūties matmenų ir bangos ilgio: kuo kliūties matmenys artimesni bangos ilgiui, tuo ryškesnė difrakcija. 
Garso bangos	Garso bangos – išilginės mechaninės bangos. Garsą apibūdinantys fizikiniai dydžiai: • garso stipris (priklauso nuo virpesių amplitudės); • garso aukštis (priklauso nuo virpesių dažnio).

Mechanika

9 Reliatyvumo teorijos pradmenys

Šiame skyriuje susipažinsite su naujos teorijos – reliatyvumo teorijos – pradmenimis, šios teorijos požiūriu išmoksite vertinti pagrindines klasikinės mechanikos sąvokas: laiką, erdvę, kūno masę ir ilgį.

9.1. Reliatyvumo teorijos samprata. Vienalaikiškumo ir laiko tarpų reliatyvumas

Pagrindinės sąvokos

Reliatyvùmo teòrija,
specialióji reliatyvùmo teòrija,
bendrója reliatyvùmo teòrija,
vienalaikiškùmo reliatyvùmas,
laĩko tárpų reliatyvùmas.

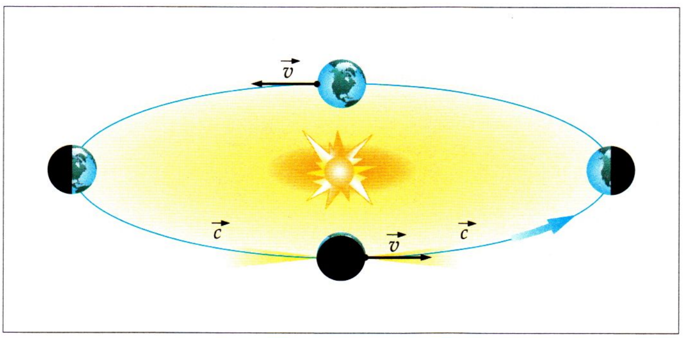
Reliatyvumo teorijos prielaidos

Klasikinę mechaniką sudaro kinematika ir dinamika. Plačiai taikomi masės, judesio kiekio bei energijos tvermės dėsniai XIX a. pabaigoje apibūdino pagrindinius mechaninius reiškinius ir bandymus. Klasikinėje mechanikoje buvo suformuluota erdvės, laiko ir judėjimo samprata, ja remiantis, paaiškinti svarbiausi fiziniai reiškiniai.

Tačiau laikinas teorijos ir eksperimento sutapimas dar nepatvirtina teorijos. 1881 m. buvo atliktas fizikinis eksperimentas, kurio klasikinė mechanika paaiškinti nesugebėjo. Eksperimentu jo autoriai Albertas Maiklsonas (*Albert Michelson*) ir Eduardas Morlis (*Eduard Morley*) siekė nustatyti, kokią įtaką šviesos greičiui turi Žemės sukimosi apie Saulę greitis (9.1.1 pav.). Šviesa iš šaltinio Žemėje sklido greičiu $\vec{c}$. Orbitinis Žemės sukimosi greitis paveiksle pažymėtas raide $\vec{v}$. Buvo lyginami greičiai, kuriais šviesa sklido Žemės orbitinio greičio kryptimi (v_1) ir priešinga jam kryptimi (v_2). Remiantis klasikiniu greičių sudėties dėsniu, šiuos greičius galima išreikšti taip:

$$v_1 = c + v, \qquad v_2 = c - v.$$

9.1.1 pav.

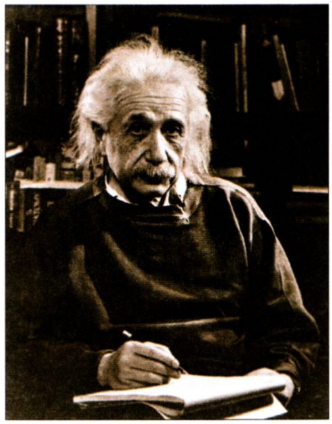


Bandymas parodė, kad Žemės sukimosi greitis neturi įtakos šviesos greičiui. Abiem atvejais greičiai buvo lygūs:

$$v_1 = v_2 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}.$$

Tokia išvada prieštaravo klasikinės mechanikos greičių sudėties dėsniui.

Kai teorija negali paaiškinti eksperimento, galima rasti dvi išeitis: tobulinti esamą teoriją arba kurti naują, pagrįstą kitais dėsniais ir gebančią išsamiau paaiškinti nagrinėjamus reiškinius. Vienas žymiausių XX a. mokslininkų Albertas Einšteinas (*Albert Einstein*) pasirinko antrąją išeitį – sukūrė naują teoriją, vadinamą ***reliatyvùmo teòrija***, arba ***reliatyvìstine mechãnika*** (angl. *relativity* – reliatyvumas). Ji pagrindė naują požiūrį į erdvę, laiką, medžiagą ir judėjimą. Laikydamasis naujo požiūrio į erdvę ir laiką, Einšteinas įrodė, kad klasikinės mechanikos dėsniai yra atskiras sudėtingesnių dėsnių atvejis.



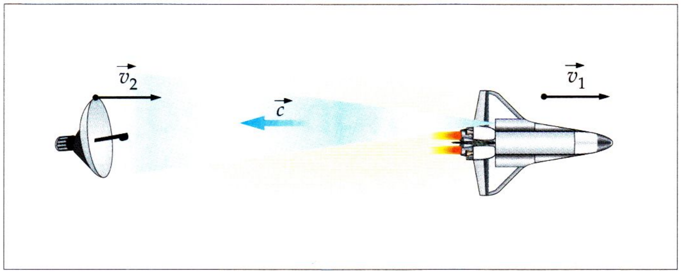
Albertas Einšteinas

Skiriamos dvi šios teorijos šakos: specialioji ir bendroji reliatyvumo teorija. ***Specialióji reliatyvùmo teòrija*** nagrinėja fizikinius reiškinius, vykstančius tik inercinėse atskaitos sistemose, t. y. sistemose, judančiose viena kitos atžvilgiu tiesiai ir tolygiai. ***Bendróji reliatyvùmo teòrija*** tiria fizikinius reiškinius, vykstančius su pagreičiu judančiose neinercinėse atskaitos sistemose.

Reliatyvumo teorijos postulatai

Specialioji reliatyvumo teorija grindžiama dviem postulãtais (lot. *postulatum* – reikalavimas), t. y. teiginiais, priimamais be įrodymo. Pirmasis apibendrina ir papildo Galilėjaus klasikinį reliatyvumo principą. Jis teigia, kad ***visi gamtos reiškiniai bet kurių inercinių atskaitos sistemų atžvilgiu vienodomis sąlygomis vyksta vienodai. Jokiais fizikiniais bandymais, atliekamais uždaroje inercinėje sistemoje, negalima nustatyti, ar ta sistema nejuda, ar juda tiesiai ir tolygiai.*** Šis postulatas rodo, kad visos inercinės atskaitos sistemos yra lygiavertės ir jokiais bandymais negalima nustatyti skirtumo tarp tolyginio judėjimo bei rimties.

Antrasis reliatyvumo teorijos postulatas siejasi su Maiklsono ir Morlio eksperimentu. Jis teigia, kad



9.1.2 pav.

šviesos greitis vakuume (c) yra vienodas visose inercinėse atskaitos sistemose ir nepriklauso nei nuo šviesos šaltinio, nei nuo stebėtojo greičio. Greitis c yra ribinis bet kurių signalų sklidimo greitis.

Sakykime, iš erdvėlaivio, skriejančio greičiu $\vec{v}_1$ (9.1.2 pav.), pasiunčiamas šviesos signalas. Jo greitis yra $\vec{c}$. Imtuvo, judančio greičiu $\vec{v}_2$, atžvilgiu šis signalas sklinda greičiu $\vec{c}$. Vadinasi, šviesos greitis nepriklauso nei nuo imtuvo, nei nuo šaltinio greičio. Šviesos greitis – pats didžiausias gamtoje egzistuojantis greitis. Jis yra baigtinis ir lygus $3 \cdot 10^8$ m/s. Materialieji kūnai negali judėti greičiu, didesniu už šviesos greitį.

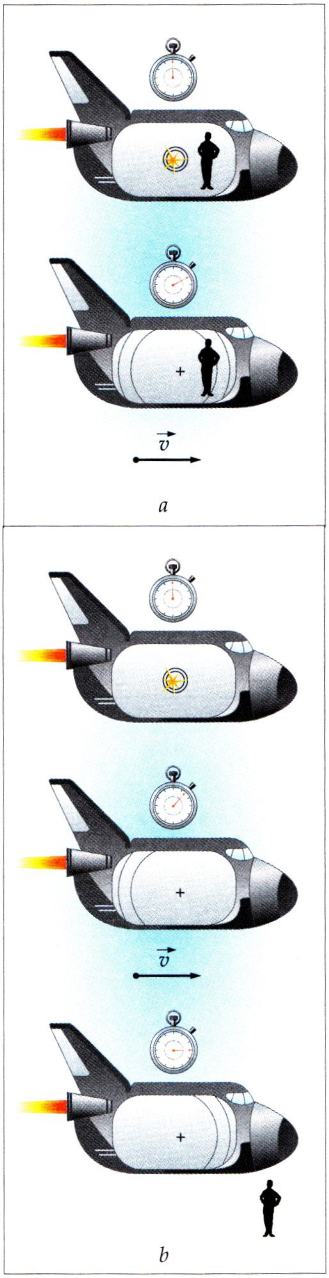
Vienalaikiškumo reliatyvumas

Reliatyvumo teorijos postulatai verčia kitaip traktuoti pagrindines fizikos sąvokas: erdvę ir laiką. Klasikinės mechanikos požiūriu laikas, kurio metu įvyko koks nors įvykis, yra vienodas visose atskaitos sistemose. Žinant konkretų laiką, galima rasti nepaprastai daug tuo pačiu metu vykstančių reiškinių. Klasikinėje mechanikoje sąvokos „anksčiau", „dabar" ir „vėliau" yra absoliučios ir nepriklauso nuo atskaitos sistemos. Visiems pasaulyje vykstantiems įvykiams nustatoma bendra chronologinė tvarka.

Tačiau klasikinė laiko samprata teisinga tik tam tikromis sąlygomis. Sąvoka „dabar" klasikinėje mechanikoje reiškia tą laiko momentą, kada pojūčiais gaunama informacija. Pavyzdžiui, žiūrėdami tiesiogiai transliuojamą televizijos laidą, žinome, kad įvykiai, matomi ekrane, iš tikrųjų yra įvykę anksčiau. Pavyzdžiui, jei televizijos bokštas yra už 30 km nuo mūsų namų, tai televizoriaus ekrane matome įvykius, kurie įvyko prieš 10^{-4} s (nes elektromagnetinės bangos sklinda šviesos greičiu $c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

Įvykiai yra vienalaikiai, jeigu, jiems vykstant, sinchronizuoti laikrodžiai rodo tą patį laiką. Kaip sinchronizuojami laikrodžiai? Sakykime, astronautas nori išsiaiškinti, ar vienodai rodo laikrodžiai, esantys priešinguose skriejančio erdvėlaivio galuose (9.1.3 pav., *a*). Iš laivo vidurio jis pasiunčia šviesos signalą. Šviesa abu laikrodžius pasiekia vienu metu. Jei tuo metu laikrodžiai rodo vienodai, jie – sinchronizuoti.

Tarkime, kad tuos pačius įvykius seka kitas stebėtojas, esantis šalia erdvėlaivio (9.1.3 pav., *b*). Jis žino, kad šviesos greitis yra pastovus ir nepriklauso nuo erdvėlaivio judėjimo. Šiam stebėtojui atrodo, kad dešinė laivo siena artėja prie šviesos šaltinio, o kairė nuo jo tolsta. Todėl stebėtojas mano, kad šviesos signalas dešinę laivo sieną pasiekia anksčiau negu kairę. Akivaizdu, kad šis laiko skirtumas yra labai mažas, tačiau jo paneigti negalima. Du įvykiai, vienalaikiai vienoje inercinėje atskaitos sistemoje, nėra vienalaikiai kitoje inercinėje atskaitos sistemoje. Taigi ***vienalaikiškumas yra reliatyvus.*** Šio reliatyvumo priežastis – baigtinis signalo plitimo greitis.



9.1.3 pav.

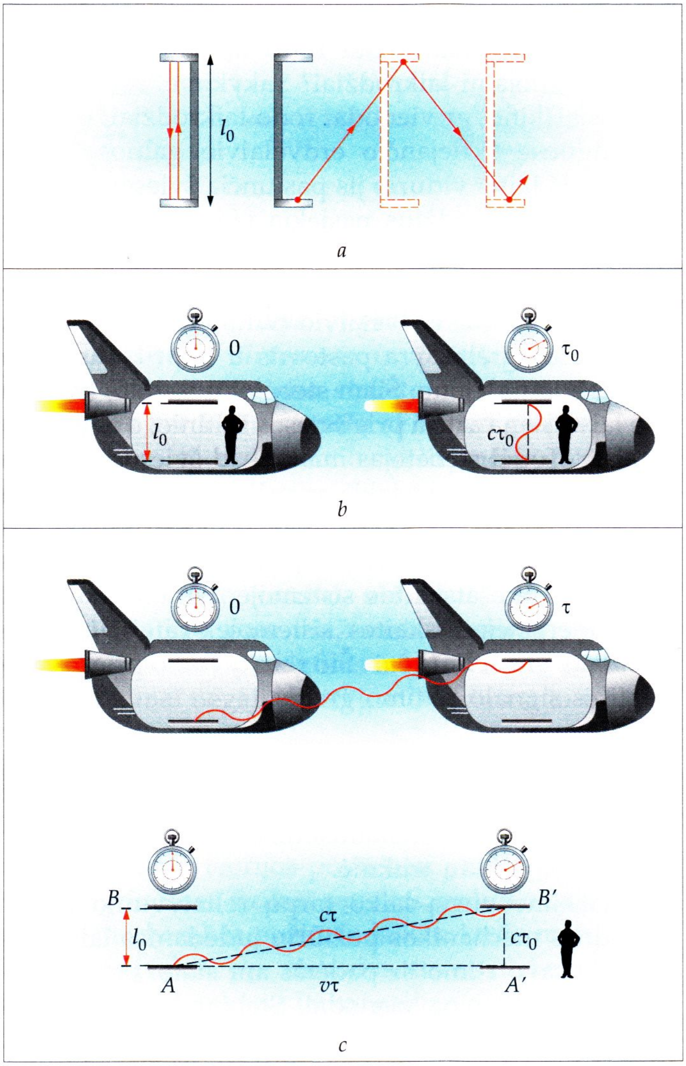
Laiko tarpų reliatyvumas

Jei reliatyvus vienalaikiškumas, tai reliatyvus ir pats laikas, įvykių trukmė.

Aptarkime vieną laiko tarpų reliatyvumo atvejį. Klasikinės mechanikos požiūriu judėdamas laikrodis nekeičia savo ritmo: ir padėtas ant stalo, ir užsegtas ant rankos, jis eina vienodai. Stebint šviesos reiškinius, matyti, kad judančio laikrodžio ritmas keičiasi. Šį teiginį įrodo vadinamasis „šviesos laikrodis". Jį sudaro strypas, kurio galuose įtaisyti du vienas su kitu lygiagretūs veidrodžiai (9.1.4 pav., *a*). Tarp veidrodžių žemyn ir aukštyn juda šviesos signalo impulsas. Šviesai atsispindėjus nuo apatinio veidrodžio, laikrodis kaskart sutiksi. Pirmasis stebėtojas (9.1.4 pav., *b*), esantis skriejančiame erdvėlaivyje, fiksuoja tokį laiko tarpą tarp dviejų tiksėjimų:

$$\tau_0 = \frac{2l_0}{c}. \qquad (9.1)$$

Laikas τ_0, kurį matuoja stebėtojas, judantis kartu su laikrodžiu, vadinamas ***savúoju laikù***. Visi parametrai, išmatuoti judančioje atskaitos sistemoje, taip pat



9.1.4 pav.

vadinami savaisiais: savàsis iĩlgis l_0, savóji mãsė m_0. Juos nagrinėsime šiek tiek vėliau.

Antrajam, nejudančiam, stebėtojui (9.1.4 pav., *c*) šviesos signalo impulso kelias, taigi ir laiko tarpas τ tarp dviejų laikrodžio tiksėjimų, atrodys ilgesnis nei erdvėlaivyje esančiam stebėtojui. Vadinasi, judančios ir nejudančios atskaitos sistemos atžvilgiu laikas eina skirtingu greičiu:

$$\tau_0 \neq \tau.$$

Remdamiesi Pitagoro teorema ir brėžinyje pateiktais duomenimis, galėtume įrodyti, kad laiko tarpas tarp dviejų laikrodžio tiksėjimų judančioje atskaitos

sistemoje (τ_0) ir nejudančioje atskaitos sistemoje (τ) susiję taip:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \qquad (9.2)$$

čia v – judančios sistemos greitis, c – šviesos greitis. (9.2) sąryšis vadinamas ***Lòrenco fòrmule***. Ji rodo, kad to paties įvykio trukmė yra skirtinga, reliatyvi. Kuo artimesnis šviesos greičiui judančios sistemos greitis (v), tuo labiau joje sulėtėja laikas. Lentelėje pateikiame keletą laiko sulėtėjimo koeficientų verčių:

$\frac{v}{c}$	Sulėtėjimo koeficientas	$\frac{v}{c}$	Sulėtėjimo koeficientas
0	1	0,9	2,29
0,2	1,02	0,99	7,09
0,4	1,09	0,999	22,37
0,6	1,25	0,9999	70,7
0,8	1,67	0,99999	223,6

Atsižvelgdami į lentelės duomenis, aptarkime tokį atvejį. Sakykime, raketa juda $0{,}8c$ greičiu Žemės atžvilgiu. Žvilgtelėjęs į savo laikrodį, astronautas teigia, kad praėjo 100 s, o Žemėje esantis stebėtojas – kad 167 s. Taigi raketoje laikas eina lėčiau.

Laiko sulėtėjimas – paties laiko savybė. Todėl judančiose atskaitos sistemose sulėtėja ne tik laikas, bet ir visi fizikiniai, cheminiai bei biologiniai procesai, vykstantys žmogaus organizme. Vadinasi, atskaitos sistemose, judančiose greičiais, artimais šviesos greičiui, sulėtėja ir gyvenimo tėkmė. Kaip tai priklauso nuo sistemos greičio, rodo lentelėje pateikti duomenys.

Klausimai ir užduotys ??

1. Ką parodė Maiklsono ir Morlio eksperimentas? Kodėl jis prieštaravo klasikinės mechanikos greičių sudėties dėsniui?

2. Ką tiria specialioji ir bendroji reliatyvumo teorija?

3. Suformuluokite reliatyvumo teorijos postulatus.

4. Pateikite pavyzdžių, įrodančių, kad vienalaikiškumas yra ne absoliuti, o santykinė reiškinių charakteristika, priklausanti nuo stebėtojo padėties erdvėje. Juos pagrįskite.

5. Koks laikas vadinamas savuoju?

6. Nuo ko priklauso laiko sulėtėjimas: nuo šviesos savybių, šviesos laikrodžio konstrukcijos ar paties laiko savybių?

7. Kiek kartų sulėtėja laikas raketoje, skriejančioje $2{,}6 \cdot 10^8$ m/s greičiu Žemės atžvilgiu? (2 kartus)

8. Laiko tarpą tarp tų pačių įvykių matavo du stebėtojai: vienas – Žemėje, kitas – skriejančioje raketoje. Anot pirmojo, šis laiko tarpas lygus 125 s, anot antrojo – 100 s. Kokiu greičiu skriejo raketa? (0,6*c*)

9.2. Ilgio reliatyvumas. Reliatyvistinė dinamika

Pagrindinės sąvokos

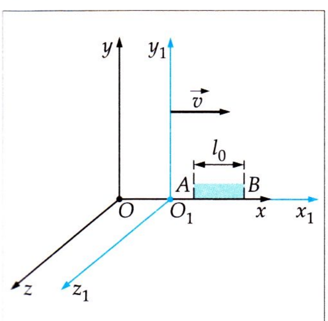
Il̃gio reliatyvùmas, mãsės reliatyvùmas, rimtiẽs mãsė, rimtiẽs enèrgija.

Kūno ilgio priklausomybė nuo greičio

Klasikinėje mechanikoje kūno ilgis yra nekintamas dydis. Pavyzdžiui, neabejojame, kad to paties automobilio ilgis jame sėdinčio vairuotojo ir pakelėje stovinčio stebėtojo atžvilgiu yra vienodas. Reliatyvistinėje mechanikoje ***kūno ilgis nėra absoliutus dydis***. Jis priklauso nuo kūno judėjimo greičio. Judėdamas greičiais, artimais šviesos greičiui, kūnas sutrumpėja. Sakykime, strypas *AB* atskaitos sistemoje $O_1x_1y_1z_1$ nejuda (9.2.1 pav.). Jo ilgį (savąjį ilgį) šios sistemos atžvilgiu pažymėkime l_0. Jei atskaitos sistema $O_1x_1y_1z_1$ juda greičiu v ($v \approx c$) sistemos *Oxyz* atžvilgiu, tai jos atžvilgiu strypas taip pat juda greičiu, artimu šviesos greičiui. Strypo ilgį sistemos *Oxyz* atžvilgiu pažymėkime l. Reliatyvumo teorijoje įrodoma, kad to paties strypo ilgis skirtingų atskaitos sistemų atžvilgiu yra nevienodas. Strypo ilgį judančioje atskaitos sistemoje (l_0) ir nejudančioje atskaitos sistemoje (l) sieja formulė

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}. \qquad (9.3)$$

9.2.1 pav.



Ji rodo, kaip kinta dideliu greičiu judančio kūno ilgis jo judėjimo kryptimi. Iš jos matyti, kad $l < l_0$. Pavyzdžiui, jei stalas toltų nuo jūsų greičiu, artimu

šviesos greičiui, tai sutrumpėtų tik ta jo kraštinė, kuri būtų išilgai stalo judėjimo krypties. Statmenos kraštinės ilgis liktų nepakitęs. Skersiniai kūno matmenys visose atskaitos sistemose yra vienodi.

Anot reliatyvumo teorijos, kūno ilgis skiriasi dėl to, kad šviesos greitis visose atskaitos sistemose yra vienodas, o laiko tarpai – reliatyvūs.

Kūno masės priklausomybė nuo greičio

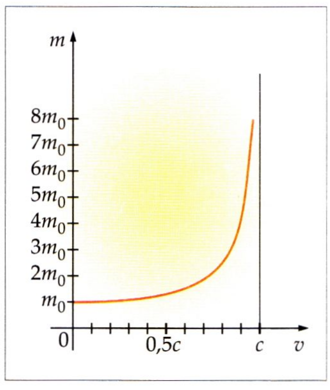
Klasikinėje mechanikoje kūno masė yra pastovus dydis. Kai kūnas nejuda arba juda mažu greičiu, jo masė nekinta. Tada iš antrojo Niutono dėsnio išplaukia, kad pastovi jėga, ilgai veikdama kūną, gali suteikti jam be galo didelį greitį. Tačiau kūnas negali judėti greičiau negu šviesa vakuume. Atrodytų, reliatyvumo teorija prieštarauja klasikinei mechanikai. Vis dėlto ji nepaneigia klasikinės mechanikos dėsnių. Šį prieštaravimą reliatyvumo teorija išsprendžia keisdama klasikinį požiūrį į kūno masę – masė nėra pastovus dydis. Masę laikant kintama, minėtas prieštaravimas išnyksta. ***Kūno masė priklauso nuo jo greičio: didėjant greičiui, masė didėja.*** Vadinasi, ta pati jėga kūnui suteikia mažesnį pagreitį. Judančio kūno masė reliatyvumo teorijoje apskaičiuojama pagal formulę

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \qquad (9.4)$$

čia m_0 – nejudančio kūno masė, vadinama savąja, arba rimties, mase, v – kūno judėjimo greitis. Judančio kūno masės priklausomybė nuo greičio pavaizduota 9.2.2 paveiksle.

Kai kūnas juda daug mažesniu greičiu nei šviesa vakuume ($v << c$), jo masė mažai skiriasi nuo rimties masės m_0, nes $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1$. Masės pokytis labai išryškėja tada, kai kūnų greitis pasidaro artimas šviesos greičiui. Tokius pokyčius pavyksta užfiksuoti šiuolaikiniuose elementariųjų dalelių greitintuvuose. Pavyzdžiui, jei elementariosios dalelės greitis yra 90 km/s mažesnis už šviesos greitį vakuume, tai dalelės masė padidėja daugiau kaip 40 kartų. Galinguose greitintuvuose elektrono masė padidėja tiek, kad 2000 kartų persveria protono masę.

9.2.2 pav.



Masės ir energijos sąryšis

Klasikinėje mechanikoje materija skirstoma į dvi rūšis: medžiagą ir lauką. Medžiaga apibūdinama mase, o laukas – energija. Iš čia išplaukia du tvermės dėsniai: masės tvermės dėsnis ir energijos tvermės dėsnis. Pagal reliatyvumo teoriją medžiaga ir laukas iš esmės nesiskiria vienas nuo kito: turėdama masę, medžiaga turi ir energijos; turėdamas energijos, laukas turi masę.

Remdamasis energijos tvermės dėsniu bei masės priklausomybe nuo judėjimo greičio, Einšteinas nustatė masės ir energijos sąryšį reliatyvistinėje mechanikoje. Jis formuluojamas taip: ***pilnutinė kūno energija yra tiesiogiai proporcinga jo masei.*** Matematinė šio sąryšio išraiška yra

$$E = mc^2. \tag{9.5}$$

Nagrinėdami šiluminius reiškinius, sužinojote, kad kūno dalelių judėjimo greitis priklauso nuo temperatūros. Kaitinant kūną, jo dalelių judėjimo greitis didėja. Kuo daugiau energijos suteikiama kaitinamam kūnui, tuo didesniu greičiu juda jį sudarančios dalelės. Tačiau nuo dalelių judėjimo greičio priklauso jų masė (9.4). Vadinasi, kūnui suteikta energija susijusi su kūno mase.

Iš masės ir energijos sąryšio (9.5) išplaukia, jog kūno masės prieaugis dėl padidėjusio greičio lygus kūnui suteiktos energijos ir šviesos greičio vakuume kvadrato santykiui:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \tag{9.6}$$

Masės pokytį pastebėti sunku, nes koeficientas $\frac{1}{c^2}$ yra labai mažas. Skaičiavimai rodo, kad 1 kg vandens, pašildyto nuo 10 °C iki 100 °C, masė padidėja tik $4{,}2 \cdot 10^{-12}$ kg. Vadinasi, įprastinėmis sąlygomis šildomų kūnų masė pakinta tiek, kad realiai to pokyčio pastebėti neįmanoma. Tačiau, vykstant elementariųjų dalelių ir atomų branduolių virsmams, energija pakinta smarkiai, todėl masės pokytis jau pastebimas.

Į Einšteino lygtį (9.5) įrašę kūno masės priklausomybės nuo greičio išraišką (9.4), gauname:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{9.7}$$

Kai kūno greitis mažas, (9.7) formulę galima užrašyti kitaip:

$$E \approx m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}. \qquad (9.8)$$

Antrasis jos narys $\frac{m_0 v^2}{2}$ yra kinetinė kūno energija, nagrinėjama klasikinėje mechanikoje. Pirmojo formulės nario m_0c^2 klasikinėje mechanikoje nėra, o reliatyvumo teorijoje jis reiškia nejudančio kūno energiją, vadinamą ***rimtiẽs enèrgija*** E_0. Vadinasi, kiekvienas kūnas energijos turi jau vien dėl to, kad egzistuoja. Kūno rimties energija yra tiesiogiai proporcinga jo rimties masei. Rimties masės buvimą įrodo eksperimentai – ją turinčių dalelių skilimas į jos neturinčias daleles. Visa skylančių dalelių rimties energija virsta atsiradusių dalelių kinetine energija.

Spinduliuodami energiją, kūnai netenka masės. Pavyzdžiui, Saulės, kurios spinduliavimo galia yra $3{,}8 \cdot 10^{26}$ W, masė kas sekundę sumažėja maždaug 4 milijonais tonų. Kūnui spinduliuojant, dalis jo rimties masės virsta fotonų mase, o dalis rimties energijos – spinduliuotės energija.

Klausimai ir užduotys ??

1. Kaip priklauso kūno ilgis nuo kūno greičio?

2. Kaip reliatyvumo teorija aiškina kūno ilgio priklausomybę nuo greičio?

3. Kaip kūno masė susijusi su jo greičiu?

4. Protonas lekia $2{,}4 \cdot 10^8$ m/s greičiu. Protono rimties masė lygi $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg. Apskaičiuokite judančio protono masę. ($2{,}78 \cdot 10^{-27}$ kg)

5. Kaip masė susijusi su energija?

6. Kas yra rimties energija?

7. Elektrono rimties masė lygi $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Apskaičiuokite elektrono rimties energiją. ($8{,}19 \cdot 10^{-22}$ J)

8. Kaip kinta kaitinamo kūno masė? Pateikite pavyzdžių.

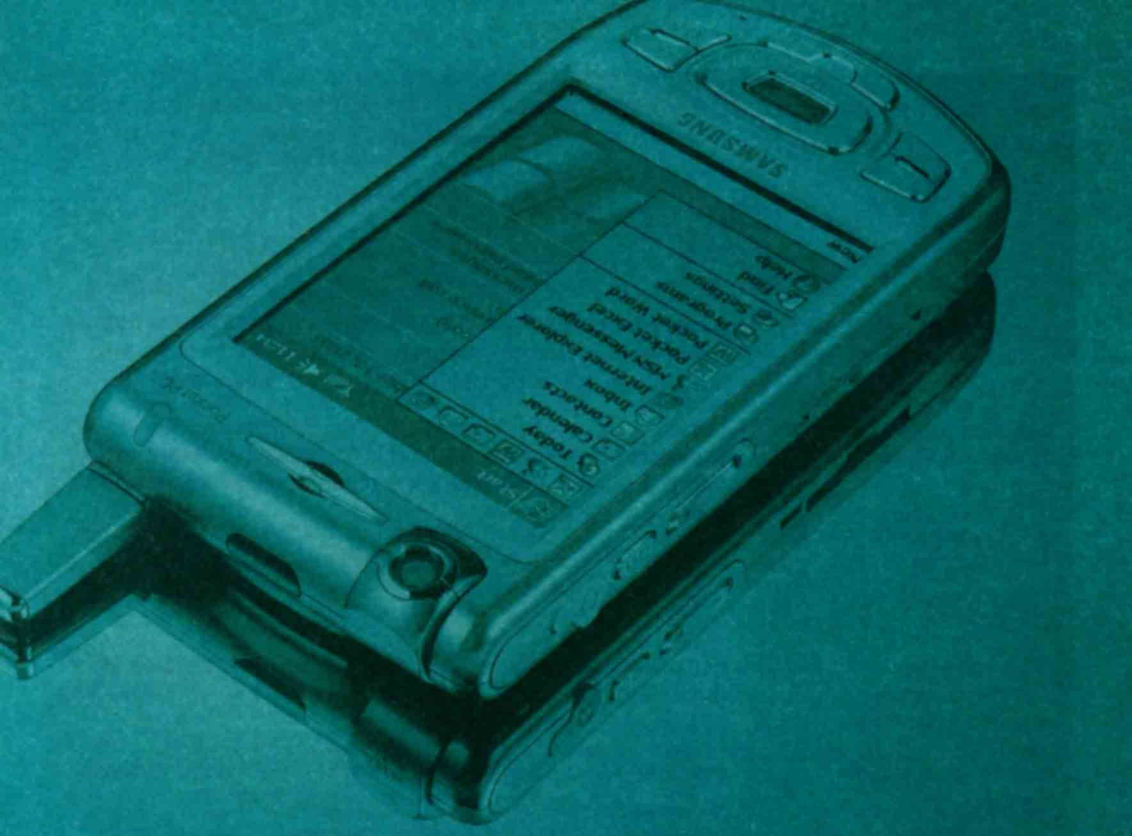
9. Elektriniame arbatinyje užvirinta 1,5 l vandens, kurio pradinė temperatūra buvo 20 °C. Apskaičiuokite, kiek pakito šildomo vandens masė. ($5{,}6 \cdot 10^{-12}$ kg)

10. Keliamuoju kranu 20 t plytų keliama į 5 m aukštį. Apskaičiuokite, kiek pakinta keliamų plytų masė. ($1{,}1 \cdot 10^{-11}$ kg)

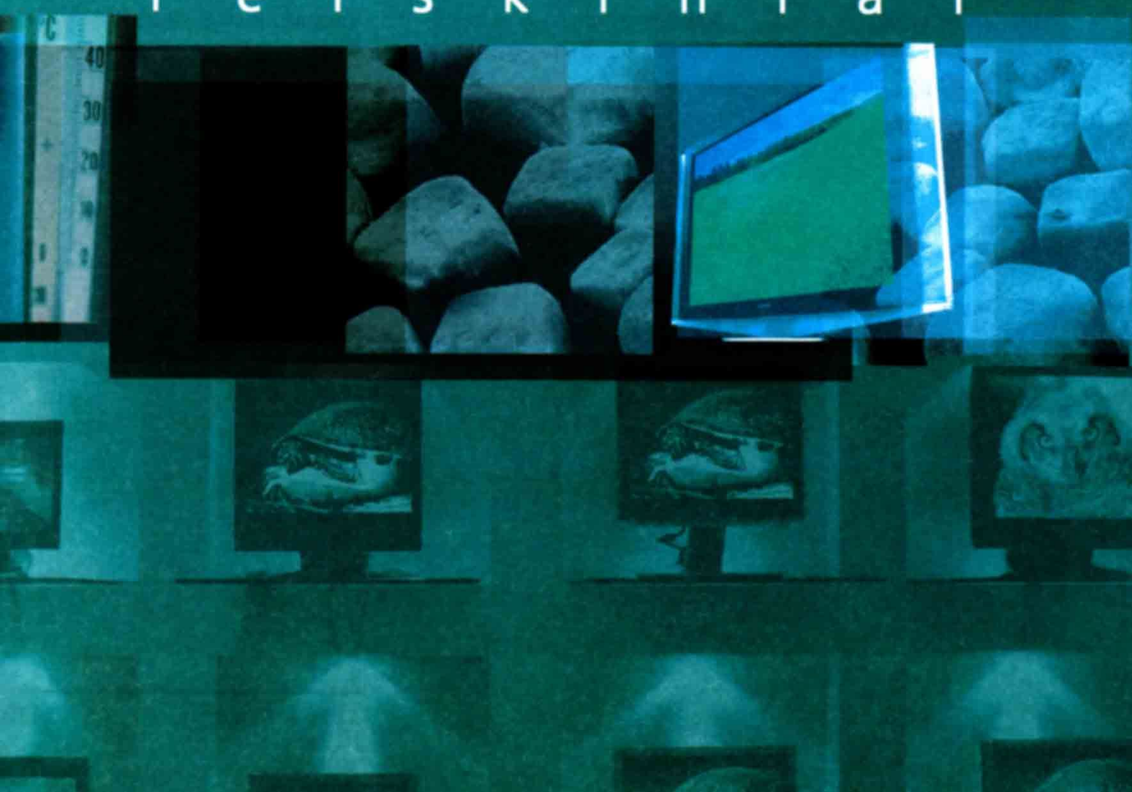
Skyriaus „Reliatyvumo teorijos pradmenys“ apibendrinimas

Bendroji reliatyvumo teorija	Bendroji reliatyvumo teorija nagrinėja fizikinius reiškinius, vykstančius neinercinėse atskaitos sistemose.
Specialioji reliatyvumo teorija	Specialioji reliatyvumo teorija tiria fizikinius reiškinius, vykstančius inercinėse atskaitos sistemose.
Šviesos greitis	Šviesos greitis c yra didžiausias bet kurios sąveikos plitimo greitis; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Kūnai negali judėti greičiau nei šviesa vakuume.
Reliatyvumo teorijos postulatai	1. Visi gamtos reiškiniai bet kurių inercinių atskaitos sistemų atžvilgiu vienodomis sąlygomis vyksta vienodai. Jokiais fizikiniais bandymais, atliekamais uždaroje inercinėje atskaitos sistemoje, negalima nustatyti, ar ta sistema nejuda, ar juda tiesiai ir tolygiai. 2. Šviesos greitis vakuume yra vienodas visose inercinėse atskaitos sistemose ir nepriklauso nei nuo šaltinio, nei nuo stebėtojo greičio. Greitis c yra ribinis bet kurių šviesos signalų sklidimo greitis.
Vienalaikiškumo reliatyvumas	Du įvykiai, vienalaikiai vienoje inercinėje atskaitos sistemoje, nėra vienalaikiai kitoje inercinėje atskaitos sistemoje. Vienalaikiškumas yra reliatyvus.
Ilgio reliatyvumas	Judantis kūnas sutrumpėja. Jo ilgis $$l = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}};$$ čia l_0 – savasis kūno ilgis, t. y. ilgis su judančiu kūnu susietoje atskaitos sistemoje, l – to paties kūno ilgis nejudančioje atskaitos sistemoje.

Laiko tarpų reliatyvumas	Laiko tarpas tarp dviejų įvykių nejudančios atskaitos sistemos atžvilgiu išreiškiamas taip: $$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};$$ čia τ_0 – savasis laikas, t. y. laiko tarpas, kurį matuoja su pasirinkta sistema judantis laikrodis, τ – laiko tarpas tarp tų pačių įvykių nejudančios sistemos atžvilgiu. Judančioje atskaitos sistemoje ($v \to c$) laikas sulėtėja.
Masės reliatyvumas	Kūno masė priklauso nuo greičio: greičiui didėjant, masė taip pat didėja. Judančio kūno masė apskaičiuojama pagal formulę $$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};$$ čia m_0 – nejudančio kūno masė, arba rimties masė, m – judančio kūno masė.
Masės ir energijos sąryšis	Pilnutinė kūno energija yra tiesiogiai proporcinga jo masei: $$E = mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$
Rimties energija	Rimties energija $E = m_0c^2$ – tai energija, kurios turi kiekvienas nejudantis kūnas.



Šiluminiai reiškiniai



10 Molekulinės kinetinės teorijo pagrindai

Šiame skyriuje daugiau sužinosite apie medžiagos sandarą, prisiminsite, kas yra Brauno judėjimas, difuzija, temperatūra, nagrinėsite naują fizikinį modelį – idealiąsias dujas, išsiaiškinsite, kodėl dujos slegia, kaip matuojama temperatūra naudojant skirtingas temperatūros skales: Celsijaus bei Kelvino. Skyriaus pabaigoje aptarsite idealiųjų dujų parametrus (slėgį, tūrį ir temperatūrą) ir jų ryšius.

10.1. Pagrindiniai molekulinės kinetinės teorijos teiginiai

! Pagrindinės sąvokos

Šilum̀inis judė́jimas,
šilum̀inis reiškinỹs,
molekul̀inė kinètinė teòrija,
termodinãmika,
makroskòpiniai kū́nai,
molèkulė,
atòmas,
mòlis,
mòlio mãsė,
santyk̀inė molekul̀inė mãsė.

Išnagrinėtas mechaninis judėjimas – dažnai pasitaikanti, bet ne vienintelė materijos judėjimo rūšis. Per gamtos dalyko pamokas sužinojote dar apie vieną jo rūšį – kūną sudarančių dalelių judėjimą.

Medžiagą sudarančios molekulės ir atomai, kaip žinote, juda netvarkingai ir šis judėjimas vadinamas ***šiluminiù judė́jimu***. Mechaninį judėjimą pastebėti nesunku, o šiluminiam judėjimui įsivaizduoti reikia daugiau pastangų. Šiluminis judėjimas būdingas kiekvienam mus supančiam kūnui: vandens lašeliui, dujų pripildytam balionui, ledėsiui, žmogaus kūnui. Fiziniai reiškiniai, priklausantys nuo atomų ir molekulių šiluminio judėjimo, vadinami ***šilum̀iniais reiškiniaĩs***. Rasos ir rūko susidarymas, ledo tirpimas, vandens virimas, dujų skystinimas – tai vis šiluminiai reiškiniai. Visus mūsų aplinkoje vykstančius šiluminius reiškinius paaiškina dvi teorijos: ***molekul̀inė kinètinė teòrija*** ir ***termodinãmika***. Pirmoji remiasi nuostata, kad visi kūnai sudaryti iš netvarkingai judančių dalelių, antroji – energijos tvermės dėsniu, todėl neatsižvelgia į vidinę kūnų sandarą.

Pagrindiniai molekulinės kinetinės teorijos teiginiai

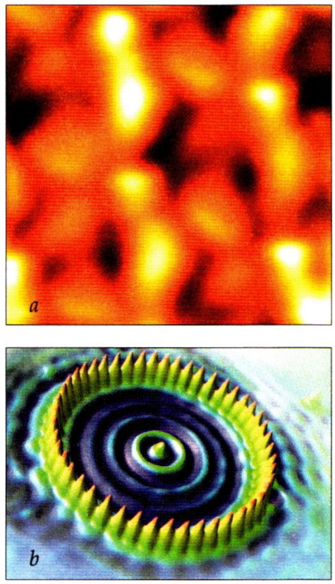
Mus supantys kūnai: sultys stiklinėje, metalinis suolo karkasas, smiltelė, vadinami ***makroskòpiniais kū́nais***, nes yra sudaryti iš daugelio atomų ar molekulių. Makroskopinių kūnų sandara ir savybės aiškinamos remiantis šiais pagrindiniais ***molekul̀inės kinètinės teòrijos teiginiaĩs***:

1. Kūnai sudaryti iš dalelių: atomų, molekulių, jonų.
2. Medžiagas sudarančios dalelės nuolat ir netvarkingai juda.
3. Kūną sudarančios dalelės tarpusavyje sąveikauja – stumia ar traukia vienos kitas.

Kad kūnai sudaryti iš dalelių, manyta dar senovės Graikijoje. Graikų filosofas Demokritas (*Demokritos*, apie 460 pr. Kr.–apie 370 pr. Kr.) teigė, kad visos medžiagos sudarytos iš mažų, plika akimi nematomų, nedalomų dalelių – ***atòmų*** (gr. *atomos* – nedalus). Demokritas pirmą kartą moksliniame pažinime iškėlė prielaidą, kad egzistuoja objektai, kurių žmogus jutimo organais tiesiogiai suvokti negali. Po šimtmečio tas pačias mintis reiškė kitas graikų filosofas – Epikūras (*Epikuros*), kiek vėliau – senovės Ròmos poetas ir mąstytojas Lukrecijus (*Lucretius*) poemoje „Apie daiktų prigimtį".

Senovės mąstytojų hipotezes beveik po dviejų tūkstančių metų, XIX a., pirmą kartą bandymais patvirtino anglų fizikas ir chemikas Džonas Daltonas (*John Dalton*, 1766–1844). Aiškindamas cheminius virsmus, jis priėjo išvadą, kad kiekvienas cheminis elementas turi savo mažiausią dalelę – atomą, o visos medžiagos sudarytos iš tarpusavyje susijusių atomų. XIX a. viduryje paplito molekulinė kinetinė dujų teorija, tirianti dujose vykstančius reiškinius.

XX a. pradžioje anglų fizikas Ernestas Rezerfordas (*Ernest Rutherford*, 1871–1937) eksperimentais pagrindė atomo sandarą ir pasiūlė planetinį atomo modelį. Pagal jį atomas sudarytas iš teigiamą krūvį turinčio branduolio ir aplink jį skriejančių elektronų. Atomų negalima matyti nei plika akimi, nei pro optinį mikroskopą. ***Atòmas*** – mažiausia chemiškai nedaloma medžiagos dalelė. Atomai jungiasi vieni su kitais, sudarydami molekules. Šiuolaikiniais skaitančiais tuneliniais mikroskopais galima gauti atskirų molekulių bei atomų vaizdus (10.1.1 pav.). Molekulę sudaro nedidelis skaičius atomų, palyginti su jų skaičiumi kūne. ***Molèkulė*** (lot. *molekula* – mažytė masė) yra mažiausia medžiagos dalelė, kuriai būdingos pagrindinės tos medžiagos cheminės savybės.



10.1.1 pav.

Molekulių matmenys

Kad molekulės yra labai mažos, galima įsitikinti atliekant paprastą bandymą. Ant vandens reikia užlašinti lašą aliejaus ir palaukti, kol jis pasklis vandens paviršiuje. Kai susidariusios plėvelės storis prilygs vienos molekulės matmenims (skersmeniui), aliejus nustos plėstis. Bandymas rodo, kad 0,001 cm^3 dydžio aliejaus lašas pasklinda 5000 cm^2 plote. Žinant plėve-

lės plotą, galima apskaičiuoti jos storį, taigi ir molekulės skersmenį:

$$d = \frac{0{,}001\ \text{cm}^3}{5000\ \text{cm}^2} = 2 \cdot 10^{-7}\ \text{cm}. \qquad (10.1)$$

Iš tikrųjų vienos molekulės skersmuo yra mažesnis. Tikslesni matavimai rodo, kad molekulių skersmuo (jei molekules laikysime rutuliukais) yra dviejų trijų šimtamilijonųjų centimetro dalių dydžio (apie 10^{-8} cm).

Molekulių skaičius. Medžiagos kiekis

Kiekviena medžiaga sudaryta iš dalelių, todėl jos kiekį įprasta laikyti proporcingu dalelių skaičiui. Bet kurią medžiagą sudaro nepaprastai daug molekulių. Bandymais nustatyta, kad normaliomis sąlygomis (esant 0 °C temperatūrai ir $1{,}01 \cdot 10^5$ Pa slėgiui) viename kubiniame centimetre bet kurių dujų yra apie $2{,}7 \cdot 10^{19}$ molekulių. Kad galėtume geriau suvokti, koks tai skaičius, palyginkime jį su mums įprastais dydžiais. Jei tiek plytų, kiek molekulių yra 1 cm^3 dujų normaliomis sąlygomis, glaudžiai sudėtume vieną šalia kitos, tai jos padengtų visą Žemės rutulio sausumą 120 m storio sluoksniu (šis storis maždaug 4 kartus didesnis už septyniaaukščio namo aukštį). Antra vertus, milžiniškas molekulių skaičius viename kubiniame centimetre dujų rodo, kad molekulės yra labai mažos. Tai patvirtina anksčiau išsakytus teiginius apie molekulių matmenis.

Kadangi bet kuriame makroskopiniame kūne molekulių yra labai daug, paprastai nurodomas ne absoliutusis, bet santykinis jų skaičius. Panašiai elgiamės ir buityje, pirkdami, pavyzdžiui, dražė – žirnelio formos saldainius. Parduotuvėje jų neskaičiuojame vienetais (pavyzdžiui, neperkame 100 saldainių), o norimą pirkinio kiekį reiškiame masės vienetais. Tarptautinėje vienetų sistemoje medžiagos kiekis reiškiamas moliais. ***Molis vadinamas medžiagos kiekis, kuriame molekulių arba atomų yra tiek pat, kiek ir 12 g anglies* (^{12}C).** Žinant vieno anglies atomo masę, galima apskaičiuoti, kiek atomų turi 12 g anglies:

$$N_A = 0{,}012\,\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \cdot \frac{1}{1{,}995 \cdot 10^{-26}\,\text{kg}} = 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}.$$

Matavimo vienetas mol^{-1} rodo, kad N_A yra atomų skaičius viename molyje medžiagos. XIX a. italų mokslininko Amadėjo Avogadro (*Amedeo Avogadro*) garbei dalelių skaičius viename molyje buvo pavadintas ***Avogãdro skaĩčiumi***. Skirtingų medžiagų (vandenilio, helio, deguonies ir pan.) viename molyje yra tiek pat atomų bei molekulių, tačiau skiriasi įvairių medžiagų vieno molio masė, nes nevienoda jų molekulės masė (m_0): vieno molio vandenilio masė yra mažesnė negu helio, o helio – mažesnė negu deguonies. ***Mòlio masè M vadinama medžiagos vieno molio masė***:

$$M = m_0 N_A. \quad (10.2)$$

Molio masė reiškiama *kilogrãmais mòliui* (kg/mol).

Medžiagos kiekį reiškiant santykiniu molekulių skaičiumi, vartojamas Avogadro skaičius. ***Mẽdžiagos kiẽkis ν lygus tam tikro kūno molekulių skaičiaus N ir Avogadro skaičiaus N_A santykiui, t. y. molekulių skaičiui viename molyje:***

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \quad (10.3)$$

Atsižvelgę į (10.3) formulę ir į tai, kad medžiagos masė lygi vienos molekulės masės m_0 bei molekulių skaičiaus N sandaugai, medžiagos kiekį galime išreikšti formule

$$\nu = \frac{m}{M}. \quad (10.4)$$

Molekulių masė

Žinome, kad kūnai yra sudaryti iš daugybės labai mažų molekulių. Lieka įvertinti vienos molekulės masę m_0. Ją apskaičiuojant, reikia medžiagos masę m padalyti iš molekulių skaičiaus N:

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{m}{\nu N_A} = \frac{M}{N_A}. \quad (10.5)$$

Taip nustatyta vienos molekulės masė yra labai maža, maždaug 10^{-23} g eilės. Pavyzdžiui, vienos vandens molekulės masė lygi $2{,}7 \cdot 10^{-23}$ g. Kadangi molekulės masė labai maža, buvo nutarta (1961 m.) skaičiuojant imti ne absoliučiąją, bet santykinę jos vertę.

Atomų ir molekulių masės pradėtos lyginti su $\frac{1}{12}$ anglies atomo masės. Šis sprendimas buvo priimtas dėl to, kad anglis įeina į daugelio cheminių elementų sudėtį, antra vertus, daugiklis $\frac{1}{12}$ priartina santykines atomines mases prie sveikųjų skaičių.

Medžiagos ***santykinė molekulinė masė*** M_r vadinamas tos medžiagos molekulės masės m_0 ir $\frac{1}{12}$ anglies atomo masės m_{0C} santykis:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}. \qquad (10.6)$$

Elemento ***santykinė atòmine masė*** A_r vadinamas vidutinės elemento atomo masės ir $\frac{1}{12}$ anglies atomo masės santykis.

Cheminių elementų santykinės atominės masės yra tiksliai išmatuotos ir pateiktos periodinėje cheminių elementų lentelėje. Norint apskaičiuoti medžiagos santykinę molekulinę masę, reikia sudėti tos medžiagos molekulę sudarančių elementų santykines atomines mases. Pavyzdžiui, apskaičiuokime NaCl (valgomosios druskos) santykinę molekulinę masę. Kadangi natrio santykinė atominė masė lygi 23, o chloro – 35, tai NaCl santykinė molekulinė masė lygi 23 + 35 = 58.

Klausimai ir užduotys ??

1. Garsus XX a. fizikas Ričardas Feinmenas (*Richard Feynman*) rašė: „Jeigu, įvykus kokiai nors pasaulio katastrofai, visos sukauptos mokslo žinios būtų sunaikintos ir ateities kartoms išliktų tik viena frazė, tai koks teiginys, sudarytas iš mažiausiai žodžių, suteiktų daugiausia informacijos? Aš manau, kad tai būtų hipotezė, jog visi kūnai yra sudaryti iš atomų – mažų nuolat judančių dalelių, kurios nedideliais atstumais viena kitą traukia, o glaudžiau suspaustos atsistumia vienos nuo kitų."

Kiek molekulinės kinetinės teorijos pagrindinių teiginių randate šioje citatoje? Įvardykite juos.

2. Apibūdinkite molekulių masę, matmenis ir skaičių.

3. Įrodykite, kad molekulių skaičių galima išreikšti formule $N = N_A \frac{m}{M}$.

4. Apskaičiuokite, kiek molekulių yra 290 g valgomosios druskos. ($2{,}98 \cdot 10^{24}$)

5. Įrodykite, kad molio masę M ir santykinę molekulinę masę M_r sieja ryšys $M \approx 10^{-3} M_r$ kg · mol^{-1}.

6. Apskaičiuokite azoto N_2 molio masę.

7. Kiek molekulių yra trijuose moliuose deguonies; helio?

8. Apskaičiuokite 30 mol anglies dioksido masę. (1,32 kg)

9. Kiek molių sudaro 100 g $C_5H_8O_2$? (1 mol)

10. Šaukštelis, kurio paviršiaus plotas 15 cm^2, padengtas plonu 2 μm storio sidabro sluoksniu. Apskaičiuokite, kiek sidabro atomų yra šiame sluoksnyje. ($1{,}756 \cdot 10^{20}$)

10.2. Šiluminis molekulių judėjimas. Molekulių sąveika

Brauno judėjimas

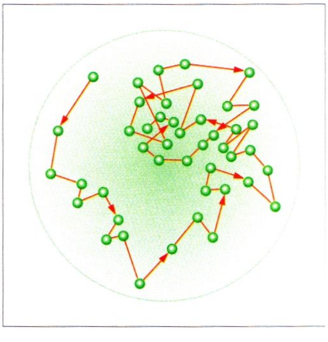
Didelę įtaką molekulinės kinetinės teorijos plėtrai turėjo škotų botaniko Roberto Brauno (*Robert Brown*, 1773–1858) darbai. Atlikdamas bandymus, Braunas 1827 m. pastebėjo, kad žiedadulkės vandens lašelyje nuolat netvarkingai juda (10.2.1 pav.). Kodėl jos juda, mokslininkas paaiškinti negalėjo. Jis iškėlė hipotezę, kad kai kurioms organinėms medžiagoms būdinga „gyvoji jėga“. Tačiau dujose bei skystyje juda ir neorganinės kilmės dalelės.

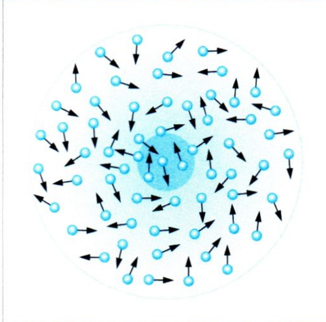
Dalelių judėjimo skystyje priežastį 1905 m. paaiškino Albertas Einšteinas. Jis sukūrė molekulinę kinetinę dalelių judėjimo teoriją. Pasak Einšteino, skystyje plaukiojančių dalelių judėjimą sukelia netvarkingas to skysčio molekulių judėjimas. Tuo pat metu į dalelę atsitrenkia daug skysčio molekulių (10.2.2 pav.). Atsitiktiniai jų smūgiai į dalelę nekompensuoja vieni kitų. Net ir maža atstojamoji šių smūgių jėga priverčia skystyje plaukiojančią lengvą dalelę judėti. Vadinasi, nenutrūkstamo dalelių judėjimo skystyje priežastis – nuolatiniai skysčio molekulių susidūrimai su dalelėmis.

Pagrindinės sąvokos

Bráuno judė́jimas,
difùzija,
molèkulių traukà,
molèkulių stūmà,
artisiẽkės jė̃gos.

10.2.1 pav.





10.2.2 pav.

Toks netvarkingas dalelių judėjimas buvo pavadintas Brauno judėjimu. Taigi ***Bráuno judė́jimas – skysčiuose (arba dujose) esančių dalelių šiluminis judėjimas.*** Jis niekada nesiliauja. Einšteinas teoriškai įrodė, kaip Brauno judėjimas priklauso nuo molekulių skaičiaus, masės ir dydžio.

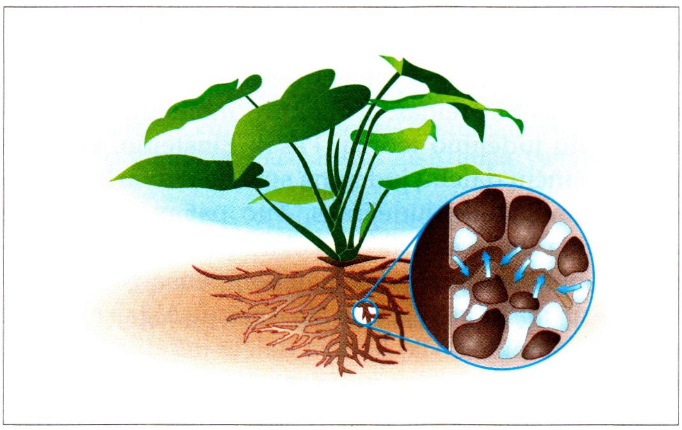
Brauno judėjimą galima stebėti ne tik skysčiuose, bet ir dujose. Tikriausiai teko matyti rūko ar dulkelių judėjimą saulės spindulių pluošte. Dalelių judėjimą įvairiose terpėse tyrė ir apibendrino prancūzų mokslininkas Žanas Perenas (*Jean Perrin*, 1870–1942). Jis taip pat domėjosi, kaip dalelių judėjimas įvairiose terpėse priklauso nuo išorinių veiksnių. Atlikti bandymai patvirtino molekulinę kinetinę teoriją.

Šiuo metu matavimams naudojami jautrūs prietaisai, kurių rodyklės ima virpėti dėl aplinkos atomų šiluminio judėjimo. Toks virpėjimas taip pat vadinamas Brauno judėjimu.

Difuzija

Dalelių judėjimą patvirtina ***difùzija*** (lot. *diffusio* – sklidimas, išsiliejimas). Su šiuo reiškiniu susipažinote mokydamiesi fizikos žemesnėse klasėse. ***Difùzija vadinamas savaiminis skirtingų medžiagų maišymasis.*** Ją paaiškina molekulinė kinetinė teorija: skirtingos medžiagos susimaišo dėl to, kad juda jų molekulės. Dėl difuzijos užtiškęs rašalas įsigeria į stalą, sklinda kvapai. Difuzija labai svarbi gyvojoje gamtoje. Dėl difuzijos maisto medžiagos patenka iš žarnyno į kraują, deguonis – į žmogaus organizmą, vanduo ir mineralinės medžiagos – į augalų šaknis (10.2.3 pav.). Difu-

10.2.3 pav.



zija vyksta ne tik dujose bei skysčiuose, bet ir kietuosiuose kūnuose.

Bandymai ir aplinkos reiškiniai rodo, kad difuzija priklauso nuo temperatūros. Kylant temperatūrai, difuzija vyksta sparčiau, nes greičiau juda medžiagas sudarančios molekulės.

Molekulių greičiai

Kokiais greičiais juda molekulės? Pirmą kartą molekulių greičiai buvo išmatuoti 1920 m. Vokiečių fizikas Otas Šternas (*Otto Stern*, 1888–1969) atliko bandymą, kurio metu nustatė sidabro molekulių greičius. Bandymui jis naudojo du bendraašius cilindrus (10.2.4 pav., *a*). Iš jų buvo išsiurbtas oras, vidiniame cilindre padarytas siauras vertikalus plyšys, o išilgai ašies ištempta plona pasidabruota platininė viela.

Tekant elektros srovei, platininė viela kaisdavo ir sidabras nuo jos paviršiaus išgaruodavo. Kai cilindrai nesisuko, sidabro atomai nusėsdavo ant vidinės išorinio cilindro sienelės tiesiai priešais plyšį, sudarydami pastebimą juostelę (10.2.4 pav., *a*).

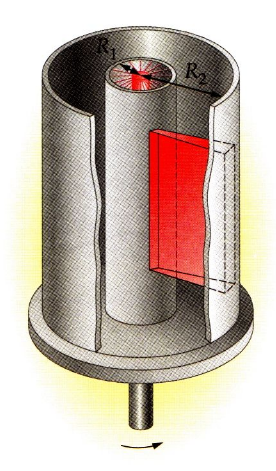
Cilindrams sukantis pastoviu kampiniu greičiu ω, sidabro juostelė atsidurdavo kitoje vietoje (10.2.4 pav., *b*). Mat kol sidabro atomai nueidavo atstumą nuo plyšio iki išorinio cilindro, šis spėdavo pasisukti atstumu *AB*.

Sidabro atomų judėjimo greitį galima išreikšti taip:

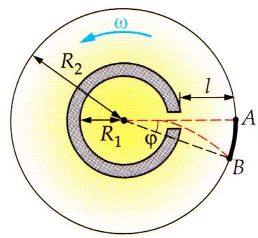
$$v = \frac{l}{\Delta t} = \frac{l\omega}{\varphi} = \frac{(R_2 - R_1)\omega}{\varphi}. \quad (10.7)$$

Iš šios formulės išplaukia, kad, norint nustatyti sidabro molekulių greitį, reikia išmatuoti kampą φ tarp dviejų juostelės padėčių ir atstumą $l = R_2 - R_1$, taip pat žinoti cilindrų sukimosi kampinį greitį.

Bandymais išmatuoti sidabro atomų greičiai sutapo su molekulinės kinetinės teorijos numatytomis vertėmis. Eksperimento rezultatai rodo, kad sidabro atomų greitis lygus maždaug 600 m/s. Sukantis cilindrams susidariusi sidabro juostelė neturėjo tikslių kontūrų, vadinasi, esant tai pačiai temperatūrai, sidabro atomai judėjo skirtingais greičiais. Vis dėlto daugumos atomų, nusėdusių vidurinėje juostelės dalyje, greičiai savo dydžiu buvo artimi vienas kitam. Neįmanoma iš anksto pasakyti, kokiu greičiu ir kokia kryptimi judės vienas ar kitas atomas, tačiau galima įžvelgti tam tikrą atomų pasiskirstymą pagal greičius.

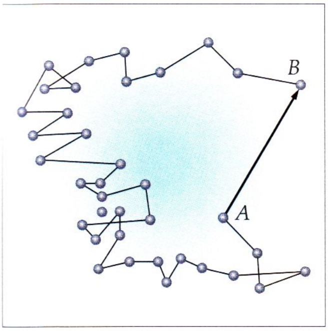


a



b

10.2.4 pav.



10.2.5 pav.

Dauguma atomų juda greičiais, artimais tam tikram greičiui, kuris vadinamas labiausiai tikėtinu. Mūsų pavyzdyje tai – 600 m/s greitis.

Nepaisant didelių molekulių judėjimo greičių, kvapai plinta lėtai. Šį prieštaravimą galima paaiškinti atsižvelgiant į molekulių susidūrimus, dėl kurių jos juda sudėtinga laužte (10.2.5 pav.). Apskaičiuota, kad kiekviena azoto molekulė, esant 0 °C temperatūrai ir normaliam atmosferos slėgiui, per 1 s susiduria su kitomis molekulėmis apie 7,5 milijardo kartų. Jos kelias nuo vieno susidūrimo iki kito siekia vos $6 \cdot 10^{-6}$ cm. Molekulė labai greitai juda laužte, tačiau jai nuskrieti nuo vieno taško (A) iki kito (B) prireikia kelių dešimčių sekundžių. Mat laužte molekulė nueina daug ilgesnį kelią nei jos poslinkis $\overrightarrow{AB}$.

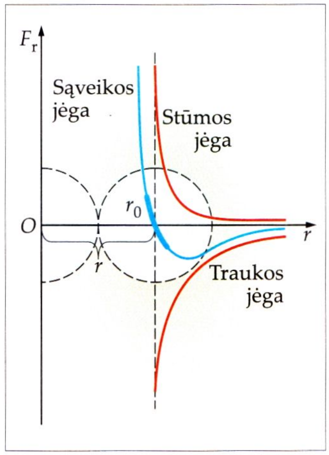
Molekulių sąveika

Medžiagos molekulės tarpusavyje sąveikauja – veikia vienos kitas traukos ir stūmos jėgomis. Apie tai sužinojote per gamtos pažinimo pamokas dar pradinėse klasėse. Dėl traukos jėgų molekulės sudaro skysčius ir kietuosius kūnus. Jeigu šios jėgos neveiktų, molekulės išsisklaidytų ir visos medžiagos pasidarytų dujinės. Molekulių tarpusavio trauka galima paaiškinti medžiagų litavimą bei klijavimą. Dėl stūmos jėgų medžiagos priešinasi gniuždymui – skysčius ir kietuosius kūnus sunku suspausti. Kokia yra šių jėgų prigimtis?

Molekulė sudaryta iš atomų, o šie – iš teigiamąjį krūvį turinčių branduolių ir neigiamąjį krūvį turinčių elektronų. Atomai yra elektriškai neutralūs, nes teigiamasis jų krūvis lygus neigiamajam krūviui. Tokios pat yra ir molekulės, tačiau jos veikia vienos kitas elektrinėmis jėgomis, nes sąveikauja gretimų molekulių branduoliai ir elektronai. Žinome, kad vienavardžiai krūviai vieni kitus stumia, o įvairiavardžiai traukia. Todėl gretimų atomų branduoliai (taip pat ir elektronai) vieni kitus stumia, o gretimų atomų branduoliai ir elektronai traukia. Vadinasi, molekulių tarpusavio sąveika yra elektrinė. Molekulių sąveikos jėgų atstojamoji lygi stūmos ir traukos jėgų modulių skirtumui. Kaip šios atstojamosios modulis priklauso nuo atstumo tarp molekulių?

Norėdami tai suprasti, pirma išsiaiškinkime traukos ir stūmos jėgų kitimą. 10.2.6 paveiksle pavaizduota dešiniąją molekulę veikiančių stūmos bei traukos jėgų (raudona spalva), taip pat jų atstojamosios (mėlyna spalva) modulio priklausomybė nuo atstumo. Kai atstumas tarp molekulių (arba atomų) yra 2–3 kartus didesnis už molekulės skersmenį, stūmos jėgos lygios nuliui ir reiškiasi tik traukos jėgos. Dvi viena prie kitos artėjančias molekules veikia traukos ir stūmos jėgos, tačiau dominuoja traukos jėgos. Kai atstumas tarp molekulių centrų pasidaro lygus molekulių spindulių r_0 sumai, stūmos jėgos padidėja tiek, kad susilygina su traukos jėgomis. Tai dviejų molekulių pusiausvyros padėtis. Tuomet stūmos ir traukos jėgų atstojamoji (sąveikos jėga) lygi nuliui: $F_r = 0$. Toliau artinant molekules, stūmos jėgos persveria traukos jėgas ir ima labai sparčiai didėti, kai atomų apvalkalai pradeda dengti vieni kitus. Stūmos jėgos stengiasi grąžinti molekules į pusiausvyros padėtį.

Tiek molekulių stūmos, tiek traukos jėgos vadinamos ***artisiẽkėmis jėgomìs***, nes, atstumui didėjant, jos greitai silpnėja. Kai atstumas tarp molekulių didesnis už 1 nm (1 nm = 10^{-9} m), jų sąveikos jėgų galima nepaisyti.



10.2.6 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname Brauno judėjimu? Kaip jis priklauso nuo temperatūros? Pateikite pavyzdžių.

2. Kodėl smulkios augalų sporos skystyje juda labai intensyviai, o stambios – vos pastebimai?

3. Plunksna nukrinta greičiau nei maža dulkelė. Kodėl?

4. Paaiškinkite litavimo, klijavimo ir dažymo procesus.

5. Palyginkite difuzijos greitį dujose, skysčiuose ir kietuosiuose kūnuose.

6. Išorinio cilindro (10.2.4 pav.) skersmuo lygus 25 cm, vidinio – 8 cm. Cilindrai sukami 50 Hz dažniu. Sidabro atomų greitis lygus 600 m/s. Apskaičiuokite kampą φ tarp dviejų juostelės padėčių. (5,1°)

7. Kiek kartų galima apjuosti Žemę per pusiaują virvute, sudaryta iš 1 cm³ esančių deguonies molekulių? Deguonies molekulės skersmuo lygus $3 \cdot 10^{-10}$ m. (200 kartų)

10.3. Molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinė lygtis

Pagrindinės sąvokos

Ideãliosios dùjos,
dùjų slė̃gis,
vãkuumas.

Idealiosios dujos

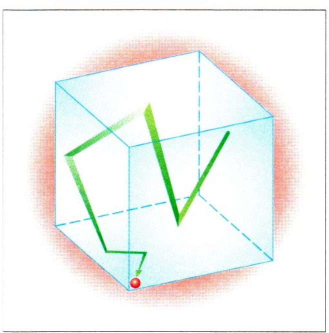
Susiejant makroskopinius dujų parametrus (slėgį ir temperatūrą) su mikroskopiniais (molekulių skaičiumi ir jų greičiu), remiamasi ***idealių̃jų dùjų*** modeliu. Jame atsižvelgiama tik į tas realiųjų dujų savybes, kurių reikia nagrinėjamiems dėsningumams paaiškinti. Idealiųjų dujų modeliui būdingos šios savybės:

- molekulių tūris yra labai mažas, palyginti su indo tūriu;
- molekulių neveikia traukos jėgos;
- molekulių judėjimo (kinetinė) energija yra daug didesnė už jų sąveikos (potencinę) energiją;
- molekulių stūmos jėgos atsiranda tik tada, kai molekulės susiduria viena su kita arba su indo sienelėmis;
- molekulių smūgiai yra tamprūs.

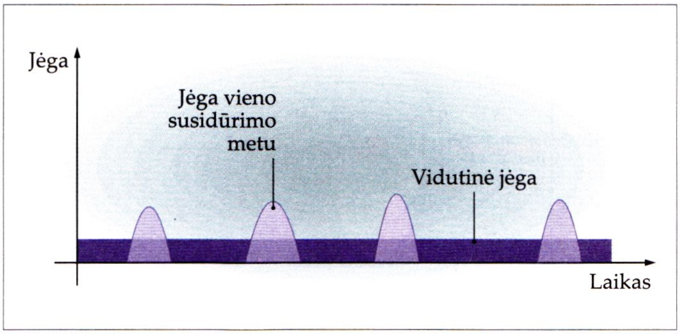
Jos rodo, kad idealiosios dujos labai panašios į praretintas realiąsias dujas, kuriose vidutinis atstumas tarp molekulių yra daug didesnis už jų matmenis. Šiuo atveju molekulių traukos jėgos neveikia, o stūmos jėgos atsiranda tik labai mažais atstumais. Remdamiesi idealiųjų dujų modeliu, išsiaiškinkime, kodėl dujos slegia indo sieneles.

Idealiųjų dujų slėgio aiškinimas

10.3.1 pav.



Dujų atomai ar molekulės juda dideliais greičiais (didesniais už garso greitį ore), be to, dideliais nuotoliais ir nuolat susiduria su indo, kuriame yra, sienelėmis (10.3.1 pav.). Kiekviena molekulė per labai trumpą laiko tarpą paveikia sienelę nedidele jėga (10.3.2 pav.). Susumavus visas šias jėgas, gaunama atstojamoji jėga, kurią galima išmatuoti. Atstojamoji jėga, tenkanti ploto vienetui, yra ***dùjų slė̃gis***. Kadangi molekulės juda visomis kryptimis vienodai, tai slėgis į visas indo sieneles taip pat vienodas. Jį matuojant,



10.3.2 pav.

manometras rodo vidutinę laiko atžvilgiu jėgą, veikiančią kiekvieną sienelės ploto elementą. Akivaizdu, kad dujų slėgis yra tuo didesnis, kuo daugiau molekulių per tam tikrą laiką susiduria su indo sienelėmis ir kuo didesniu greičiu jos juda.

Idealiųjų dujų molekulių greičiai

Dujų molekulių greičius tiksliai apibrėžti labai sunku. Viena vertus, molekulių yra labai daug ir jos juda skirtingais greičiais. Antra vertus, molekulėms susiduriant, jų greitis nuolat kinta.

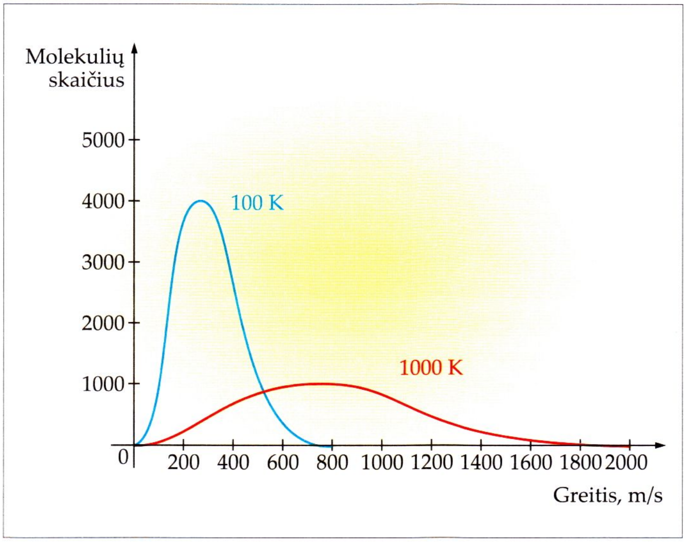
Norėdami geriau įsivaizduoti, kokie skirtingi yra dujų molekulių greičiai, pasinaudokime automobilių judėjimo pavyzdžiu. Žinome, kad didžiausias leistinasis automobilių greitis autostradoje Vìlnius–Kaũnas yra 110 km/h. Tačiau tai nereiškia, kad visi automobiliai važiuoja būtent tokiu greičiu. Vieni rieda mažesniais greičiais, kiti, kurių vairuotojai nepaiso kelių eismo taisyklių reikalavimų[1], – didesniais, tačiau dauguma laikosi ribinio greičio. Panašiai yra ir su dujų molekulėmis. Dauguma jų juda artimais vidutiniam greičiais, bet yra ir judančių greičiau bei lėčiau.

Norint įvertinti molekulių greičius, nebūtina matuoti kiekvienos molekulės greitį. Šiuo atveju svarbi vidutinė greičio vertė, arba greičio vidurkis. Skaičiuojant dujų molekulių slėgį, imamas greičio kvadrato vidurkis:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \ldots + v_N^2}{N}. \tag{10.8}$$

Greičio vektoriaus modulio kvadratas lygus jo projekcijų koordinačių ašyse kvadratų sumai. Kryptys

[1] Taip elgtis negalima.



10.3.3 pav.

Ox, *Oy* ir *Oz* dėl netvarkingo molekulių judėjimo yra lygiavertės, todėl greičio vektoriaus projekcijos kvadrato vidurkis lygus $\frac{1}{3}$ greičio kvadrato vidurkio:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}. \qquad (10.9)$$

Molekulių greičių pasiskirstymą galima pavaizduoti grafiškai. 10.3.3 paveiksle matote, kaip pasiskirsto azoto molekulių greičiai, esant 100 K ir 1000 K temperatūrai[1]. *Ox* ašyje atidėtas molekulių greitis, *Oy* ašyje – molekulių skaičius, tenkantis vienetiniam greičio intervalui. Įkaitusių dujų molekulių greičiai didesni. Jų pasiskirstymą vaizduojanti kreivė horizontalia kryptimi yra platesnė[2].

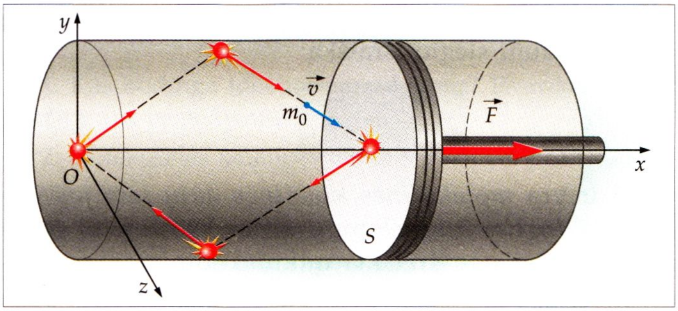
Molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinė lygtis

Molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinė lygtis sieja makroskopinį dujų parametrą – slėgį – su mikroskopiniais dydžiais, apibūdinančiais molekules ir jų judėjimą. Ją išvedant, remiamasi nuostata, kad idealiųjų dujų molekulės sąveikauja su indo sienelėmis pagal mechanikos dėsnius taip pat kaip tamprieji kūnai.

Apskaičiuokime cilindre esančių dujų slėgį į stūmoklį (10.3.4 pav.). Jei stūmoklis yra statmenas koordinačių ašiai *Ox*, tai dujų slėgis p lygus jėgos F_x (visų

[1] Kitaip tariant, kai temperatūra lygi –173 °C ir 727 °C.

[2] Šį pasiskirstymą apibūdina Maksvelo funkcija. Daugiau apie jį sužinosite mokydamiesi fizikos aukštojoje mokykloje.



10.3.4 pav.

stūmoklį veikiančių molekulių jėgų atstojamosios) ir stūmoklio ploto S santykiui:

$$p = \frac{F_x}{S}. \qquad (10.10)$$

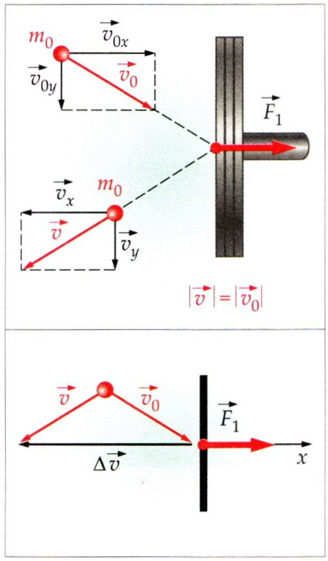
Norėdami rasti jėgų atstojamąją, pirma turime sužinoti, kokia jėga stūmoklį veikia viena molekulė. Ją apskaičiuojame remdamiesi antruoju Niutono dėsniu ir atsižvelgę į tai, kad $\Delta v_x = |v - v_0| = 2v_x$ (10.3.5 pav.):

$$F_{1x} = m_0 \cdot \frac{2v_x}{\Delta t}. \qquad (10.11)$$

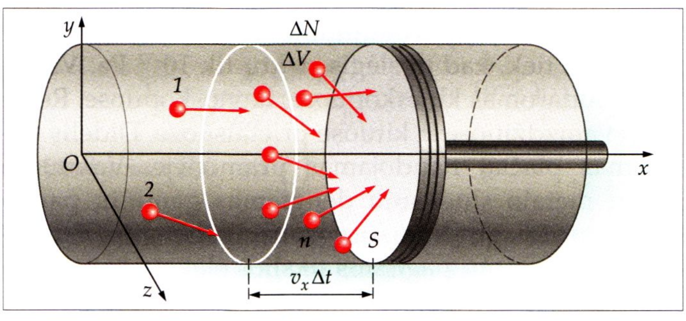
Randame molekulių, susiduriančių su stūmokliu, skaičių. Per laiko tarpą Δt į stūmoklį atsitrenkia tik tos molekulės, kurios spėja jį pasiekti (10.3.6 pav.):

$$\Delta N = \frac{1}{2} n \Delta V = \frac{1}{2} n S v_x \Delta t. \qquad (10.12)$$

Dydis n (10.12) formulėje žymi molekulių koncentraciją, o daugiklis $\frac{1}{2}$ reiškia, kad stūmoklio link juda tik pusė visų išilgai Ox ašies lekiančių molekulių. Stūmoklį veikiančių molekulių jėgų atstojamoji lygi vienos molekulės sukeltos jėgos F_{1x} ir molekulių skaičiaus ΔN sandaugai. Atsižvelgę į tai, (10.11) ir (10.12)



10.3.5 pav.



10.3.6 pav.

išraiškas įrašome į (10.10) formulę. Gaunamė tokią idealiųjų dujų slėgio išraišką:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}. \qquad (10.13)$$

Tai ir yra ***molekulìnės kinètinės dùjų teòrijos pagrindìnė lygtìs***. Ji idealiųjų dujų makroskopinį parametrą – slėgį p – išreiškia mikroskopiniais parametrais: dujų molekulės mase m_0, molekulių koncentracija n ir greičio kvadrato vidurkiu $\overline{v^2}$. ***Idealiųjų dujų slėgis yra tiesiogiai proporcingas molekulės masės, molekulių skaičiaus tūrio vienete ir molekulių greičio kvadrato vidurkio sandaugai.***

(10.13) lygties dešiniąją pusę padauginę ir padaliję iš 2 ir atsižvelgę į tai, kad vienos molekulės kinetinė energija $\overline{E_k} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$, molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinę lygtį galime užrašyti taip:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}. \qquad (10.14)$$

Idealiųjų dujų slėgis yra tiesiogiai proporcingas molekulių slenkamojo judėjimo vidutinei kinetinei energijai.

Vakuumas

Kaip minėjome, fizikinis modelis – idealiosios dujos – yra praretintos realiosios dujos. Labai smarkiai praretintos realiosios dujos vadinamos ***vãkuumu*** (tuštuma). Vakuumas skirstomas į superdidelį, didelį, vidutinį ir mažą. Kai vakuumas yra superdidelis, dujų molekulės, lėkdamos nuo vienos indo sienelės iki kitos, beveik nesusiduria. Vadinasi, molekulių laisvojo kelio (t. y. atstumo, kurį molekulė nulekia nuo vieno susidūrimo iki kito) ilgis sutampa su indo matmenimis. Šiuolaikinė vakuuminė technika dujas gali praretinti tiek, kad jų slėgis siektų tik 10^{-12} Pa. Vakuumas sudaromas kineskopuose, ikonoskopuose, Rentgeno vamzdžiuose ir kituose prietaisuose. Didelis vakuumas plačiai naudojamas pramonėje. Vakuume plonu metalo sluoksniu dengiamas gaminių paviršius, į medžiagą įterpiama įvairių priemaišų. Superdideliu vakuumu pagrįstos tikslios elektroninės technologijos.

Klausimai ir užduotys

1. Kas būdinga idealiosioms dujoms? Išvardykite pagrindinius jų požymius.

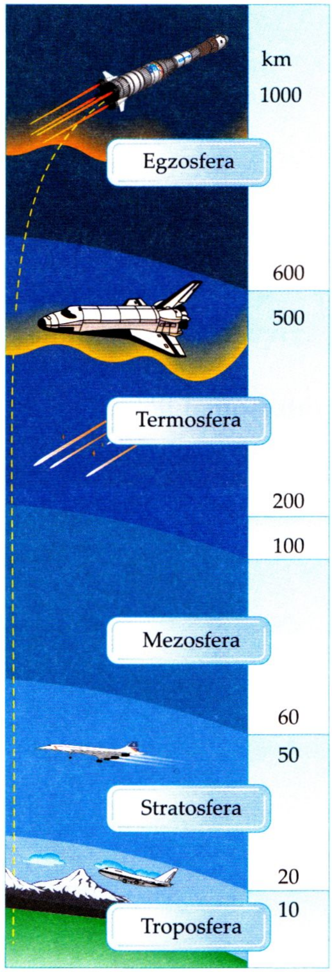
2. Molekulinės kinetinės teorijos požiūriu paaiškinkite dujų slėgį.

3*. Išvardykite svarbiausius molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinės lygties išvedimo etapus.

4. Kaip pakis dujų slėgis, jei molekulių koncentraciją perpus sumažinsime, o molekulių vidutinį greitį dvigubai padidinsime?

5. 10.3.7 paveiksle pavaizduoti Žemės atmosferos sluoksniai. Kuriuose iš jų oras yra artimiausias idealiosioms dujoms? Atsakymą pagrįskite.

6. Kodėl ausies būgnelis neplyšta dėl veikiančio jį iš išorės oro slėgio?



10.3.7 pav.

Mokomės spręsti uždavinius

1. Oro molekulių koncentracija normaliomis sąlygomis yra $2{,}7 \cdot 10^{25}$ m^{-3}. Apskaičiuokime oro molekulių vidutinę kinetinę energiją.

$\overline{E_k}$ – ?	$p_0 = 10^5$ Pa $n = 2{,}7 \cdot 10^{25}$ m^{-3}

Sprendimas

Iš molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinės lygties išreiškiame oro molekulių vidutinę kinetinę energiją:

$$p_0 = \frac{2}{3} n \overline{E_k};$$

$$\overline{E_k} = \frac{3p_0}{2n}.$$

Įrašome dydžių vertes ir apskaičiuojame:

$$\overline{E_k} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{2 \cdot 2{,}7 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}} = 5{,}6 \cdot 10^{-21} \text{ J}.$$

Atsakymas: $5{,}6 \cdot 10^{-21}$ J.

2. Apskaičiuokime deguonies dujų tankį, esant $1{,}3 \cdot 10^5$ Pa slėgiui, kai yra žinoma, kad deguonies molekulių vidutinis kvadratinis greitis[1] yra $1{,}4 \cdot 10^3$ m/s.

[1] Vidutiniu kvadratiniu greičiu vadinama kvadratinė šaknis iš greičio kvadrato vidurkio: $\overline{v} = \sqrt{\overline{v^2}}$.

ρ – ?	p = 1,3 · 10^5 Pa $\overline{v}$ = 1,4 · 10^3 m/s

Sprendimas

Taikome molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinę lygtį

$$p=\frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}. \quad (1)$$

Tankį galime išreikšti taip:

$$\rho=\frac{m}{V}=\frac{m_0N}{V}=m_0n. \quad (2)$$

Gautą tankio išraišką įrašome į (1) lygtį:

$$p=\frac{1}{3}\rho\overline{v^2}.$$

Iš čia dujų tankis

$$\rho=\frac{3p}{\overline{v^2}};$$

$$\rho=\frac{3\cdot 1,3\cdot 10^5\ \text{Pa}}{(1,4\cdot 10^3\ \text{m/s})^2}=0,2\ \text{kg/m}^3.$$

Atsakymas: 0,2 kg/m^3.

Užduotys savarankiškam darbui

1. Inde esančių dujų molekulių koncentracija 2 · 10^{25} m^{-3}, jų greičio kvadrato vidurkis 10^6 m^2/s^2, vienos molekulės masė 5 · 10^{-26} kg. Apskaičiuokite dujų slėgį. (0,33 · 10^6 Pa)

2. Deguonies dujų slėgis 1 MPa, o jų molekulių vidutinis greitis 700 m/s. Apskaičiuokite deguonies molekulių koncentraciją. (1,15 · 10^{26})

3. Inde, kurio tūris 5 m^3, yra 5 kg dujų. Jų molekulių greičio kvadrato vidurkis lygus 4,9 · 10^5 m^2/s^2. Apskaičiuokite dujų slėgį. (1,6 · 10^5 Pa)

4. Deguonies slėgis 3,01 · 10^5 Pa, tankis 2 kg/m^3. Apskaičiuokite vienos deguonies molekulės vidutinę kinetinę energiją. (1,2 · 10^{-20} J)

5. Vienatomių dujų slėgis 30 kPa, atomų koncentracija 5 · 10^{25} m^{-3}. Apskaičiuokite tų dujų atomų vidutinę kinetinę energiją. (9 · 10^{-22} J)

10.4. Temperatūra ir jos matavimas

Šiluminė pusiausvyra

Pagrindinės sąvokos

Makroskòpiniai parãmetrai,
šiluminė pusiáusvyra,
temperatūrà,
absoliučióji temperatūrà,
Bòlcmano konstánta.

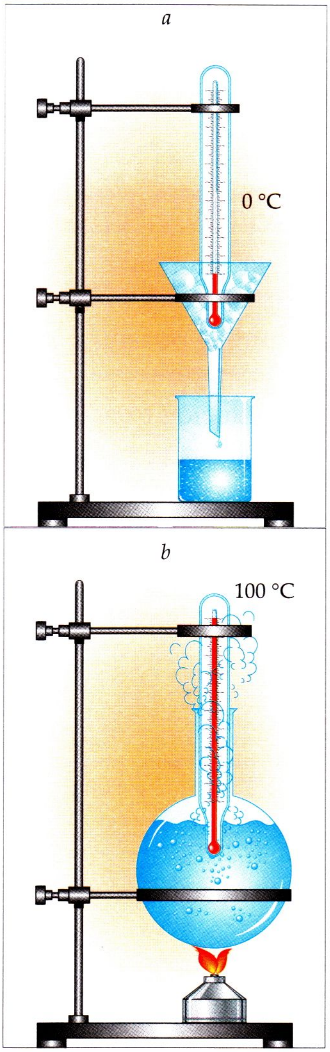
Oras klasėje, dujos vidaus degimo variklyje, ledo gabaliukas, stiklinė vandens yra makroskopinių kūnų pavyzdžiai. Šių ir kitų kūnų būsena nusakoma fizikiniais dydžiais, apibūdinančiais visą makroskopinį kūną: slėgiu p, tūriu V, temperatūra T. Fizikiniai dydžiai, apibūdinantys makroskopinį kūną, neatsižvelgiant į molekulinę medžiagos sandarą, vadinami ***makroskòpiniais parãmetrais***. Jie vartojami apibrėžiant kūnų šiluminės pusiausvyros būseną.

Aptarkime kūnų šiluminės pusiausvyros būsenos susidarymą. Iš patirties žinome, kad kūnai būna šilti ir šalti. Sulietus karštą ir šaltą kūną, makroskopiniai jų parametrai kinta. Pavyzdžiui, į indą su kambario temperatūros vandeniu įmetus ledėsį, ledas ima tirpti, o vanduo – aušti. Ledui ištirpus, vanduo pradeda šilti ir jo temperatūra kyla tol, kol susilygina su kambario oro temperatūra. Jei ši nekinta, vandens temperatūra išlieka pastovi. Sakoma, kad vanduo pereina į šiluminės pusiausvyros būseną. ***Šiluminės pusiáusvyros būsena vadiname tokią būseną, kai visi makroskopiniai parametrai yra pastovūs.*** Nusistovėjus šiluminei pusiausvyrai, kūno tūris, slėgis ir temperatūra nekinta, o jei turime kūnų sistemą, tai vienoda yra visų jos dalių temperatūra.

Temperatūros matavimas

Išmatuoti kurį nors fizikinį dydį – tai palyginti jį su etalonu. Matuojamos temperatūros negalima palyginti su etalonu, todėl termometrais matuojami kiti dydžiai, priklausantys nuo temperatūros: skysčio ar dujų tūris, dujų slėgis ir pan. Pirmąjį termometrą, dar neturėjusį skalės, 1592 m. sukonstravo Galileo Galilėjus (*Galileo Galilei*). Pirmieji tikslūs termometrai buvo pagaminti XVIII a., o jų skalės sugraduotos pagal kelis fiksuotus taškus.

Buityje temperatūra dažniausiai matuojama skysčio termometrais, arba Celsijaus termometrais. Jų



10.4.1 pav.

skalė sudaroma taip. Iš pradžių termometras dedamas į tirpstantį ledą (10.4.1 pav., *a*), paskui – į verdantį vandenį (10.4.1 pav., *b*) ir kaskart brūkšneliu pažymima jo vamzdelyje esančio skysčio stulpelio galo padėtis. Tarpas tarp brūkšnelių padalijamas į 100 lygių dalių. Skysčio stulpelio galo pokytis viena šimtąja dalimi atitinka vieną Celsijaus laipsnį (1 °C).

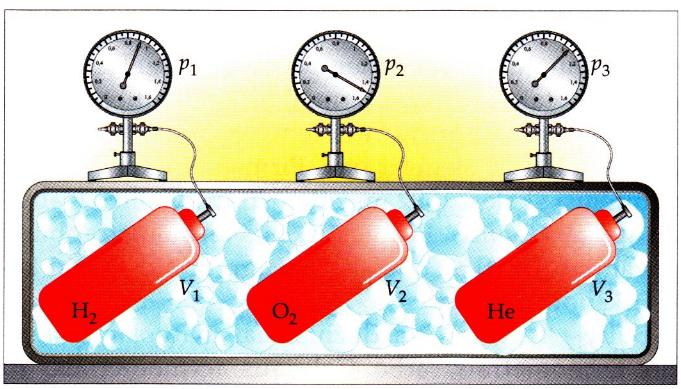
Matuojant temperatūrą, termometras suliečiamas su kūnu. Kai tarp jų nebevyksta šilumos apykaita, skysčio tūris termometre nustoja kisti. Tarp termometro ir kūno nusistovi šiluminė pusiausvyra, o termometrinio skysčio temperatūra susilygina su kūno temperatūra.

Temperatūros matavimas tokiu termometru nėra tikslus, nes susijęs su gyvsidabrio ir alkoholio plėtimosi savybėmis. Vienodai kaitinamų skirtingų skysčių tūris pakinta nevienodai. Kita netikslaus temperatūros matavimo priežastis – atskaitos pradžios, t. y. nulinės temperatūros, pasirinkimas. Matuojant temperatūrą pagal Celsijaus skalę, atskaitos pradžia pasirenkama ledo tirpimo temperatūra. Vadinasi, temperatūros atskaitos pradžia Celsijaus skalėje nustatyta susitarimu. Akivaizdu, kad ji gali būti ir kita, pavyzdžiui, vandens virimo temperatūra. Tad kaip tiksliai išmatuoti temperatūrą? Kokia yra tikroji temperatūros atskaitos pradžia?

Šiluminė dujų pusiausvyra

Atsakyti į šiuos klausimus padėjo bandymai su skirtingų rūšių dujomis: deguonimi, heliu ir vandeniliu (10.4.2 pav.). Dujų masė ir indų tūris buvo žinomi,

10.4.2 pav.



o slėgis matuojamas manometrais. Žinant dujų masę, buvo nesunku nustatyti jų molekulių skaičių N. Iš pradžių indai su dujomis buvo įdėti į tirpstantį ledą (0 °C), vėliau – į verdantį vandenį (100 °C). Bandymai parodė, kad 0 °C temperatūros kiekvienų dujų slėgio ir tūrio sandaugos bei molekulių skaičiaus santykis yra vienodas:

$$\frac{p_1V_1}{N_1}=\frac{p_2V_2}{N_2}=\frac{p_3V_3}{N_3}=\theta^1. \qquad (10.15)$$

Indus su dujomis panardinus į verdantį vandenį, visų dujų santykis $\frac{pV}{N}$ išliko vienodas, tačiau didesnis nei pirmuoju atveju. Vadinasi, kylant temperatūrai, dydis θ didėja. Dėl to jį galima laikyti temperatūros matu. Atsižvelgę į bandymu gautą priklausomybę ir pasinaudoję molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindine lygtimi, gauname:

$$\frac{pV}{N}=\frac{2}{3}\overline{E_k}=\theta. \qquad (10.16)$$

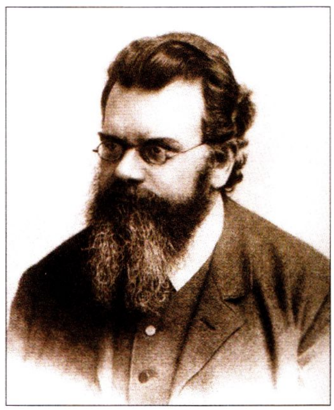
Taigi visų šiluminės pusiausvyros būsenos dujų molekulių vidutinė kinetinė energija yra vienoda. Dydis θ lygus dviem trečdaliams molekulių netvarkingo šiluminio judėjimo vidutinės kinetinės energijos. Kaip ir energija, dydis θ matuojamas džauliais. Fizikoje temperatūra reiškiama laipsniais. Dydis θ laikomas proporcingu temperatūrai T, matuojamai laipsniais:

$$\theta = kT; \qquad (10.17)$$

čia k – proporcingumo koeficientas, vadinamas ***Bòlcmano konstánta***. Taip jis pavadintas pagerbiant austrų fiziką Liudvigą Bolcmaną (*Ludwig Boltzmann*, 1844–1906). Bolcmano konstanta sieja temperatūrą θ, išreikštą energijos vienetais, su temperatūra T, išreikšta laipsniais. Kitaip tariant, ji rodo, kiek vidutiniškai pakinta vienos molekulės judėjimo energija, dujų temperatūrai padidėjus vienu laipsniu. Bolcmano konstantos vertė $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

Iš (10.16) ir (10.17) formulės išplaukia lygtis, pagal kurią galima pasirinkti temperatūros skalę, nepriklausančią nuo dujų ar skysčio rūšies:

$$\frac{pV}{N}=kT. \qquad (10.18)$$



Liudvigas Bolcmanas

[1] θ – graikų abėcėlės raidė, tariama „teta“.

Tai yra temperatūros formulė. Pagal ją galima išmatuoti temperatūrą nepaisant medžiagos šiluminio plėtimosi ypatumų.

Absoliučioji temperatūros skalė

Temperatūros matavimo skalė, sudaryta pagal (10.18) formulę, vadinama ***absoliučią́ja***, arba ***termodinãmine, skalè***. Ją pasiūlė anglų fizikas Viljamas Tomsonas, pelnęs lordo Kelvino titulą. Todėl ši skalė dar vadinama Kelvino skale. Absoliučiosios temperatūros skalės vienetas *kèlvinas* (sutrumpintai žymimas 1 K) prilyginamas vienam Celsijaus skalės laipsniui (1 °C):

$$1\ \text{K} = 1\ °\text{C}.$$

(10.18) lygties kairiosios pusės visi dydžiai yra teigiami arba lygūs nuliui, todėl ***absoliučióji temperatūrà*** gali būti tiktai teigiama arba lygi nuliui. Temperatūra, kurioje idealiųjų dujų slėgis artėja prie nulio, kai tūris pastovus, vadinama ***absoliučiúoju nuliù***.

Žinome, kad dujų slėgį sukelia molekulių smūgiai į indo sieneles. Jei slėgis išnyksta, vadinasi, molekulės nesusiduria su indo sienelėmis. Taip gali būti tik tada, kai dujų molekulės nustoja judėti. Šią prielaidą patvirtinsime dar vienu įrodymu.

Pasinaudokime (10.16) ir (10.18) lygtimi. Kadangi šių lygčių kairiosios pusės yra lygios, tai turi būti lygios ir dešiniosios pusės:

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT. \qquad (10.19)$$

Iš čia matyti, kad ***netvarkingai judančių molekulių slenkamojo judėjimo vidutinė kinetinė energija yra tiesiogiai proporcinga absoliučiajai temperatūrai.*** Vadinasi, kuo aukštesnė temperatūra, tuo greičiau juda molekulės. Taigi ***temperatūra yra molekulių vidutinės kinetinės energijos matas.*** Ši priklausomybė būdinga ne tik dujoms, bet ir skysčiams bei kietiesiems kūnams, kurių atomai gali tik svyruoti apie pusiausvyros padėtį. Kai absoliučioji temperatūra lygi nuliui, molekulių vidutinė kinetinė energija taip pat turi būti lygi nuliui. Taip dar kartą įrodėme anksčiau išsakytą teiginį, kad absoliutusis nulis yra temperatūra, kurioje molekulės nustoja judėti.

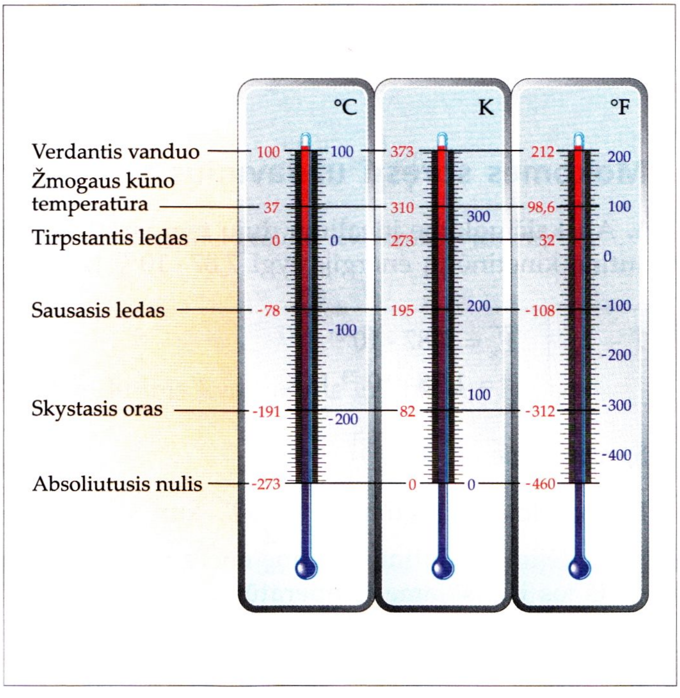
Celsijaus ir absoliučiosios skalės ryšys

Žinant Bolcmano konstantos skaitinę vertę, galima rasti absoliučiojo nulio vertę pagal Celsijaus skalę. Nustatyta, kad 0 °C temperatūra pagal Celsijaus skalę atitinka apytiksliai 273 K temperatūrą pagal absoliučiąją skalę. Kadangi temperatūros vienetas pagal absoliučiąją skalę (1 K) prilygintas temperatūros vienetui pagal Celsijaus skalę (1 °C), tai bet kuri absoliučiosios temperatūros T vertė bus 273 laipsniais didesnė už atitinkamą Celsijaus temperatūros vertę:

$$T = t + 273. \tag{10.20}$$

Iš šios lygties matyti, kad absoliutusis nulis atitinka –273 °C. 10.4.3 paveiksle palygintos Celsijaus, Kelvino ir Farenheito temperatūros skalės.

Aplinkoje galime įžvelgti gamtinių termometrų. Savotiškas gamtinis termometras gali būti gėlė, vadinama kroku. Kai temperatūra kyla, jos žiedai išsiskleidžia, kai krinta, susiglaudžia. Krokai reaguoja į 0,5 °C temperatūros pokyčius.



10.4.3 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Apibrėžkite šiluminės pusiausvyros būseną. Pateikite tokios būsenos kūnų pavyzdžių.

2. Parašykite formulę, pagal kurią būtų galima apskaičiuoti 10.4.2 paveiksle pavaizduotuose induose esančių molekulių skaičių.

3. Kuo pranašesnė Kelvino temperatūros skalė už Celsijaus?

4. Kokia yra Bolcmano konstantos fizikinė prasmė?

5. Kokia temperatūra vadinama absoliučiuoju nuliu?

6. Temperatūra pagal Celsijaus skalę lygi 30 °C. Kam ji bus lygi pagal Kelvino skalę?

7. Kaip susijusi molekulių slenkamojo judėjimo vidutinė kinetinė energija su temperatūra?

8. Iš pradžių inde esančių dujų temperatūra buvo lygi 10 °C, paskui, dujas pakaitinus, ji pakilo iki 40 °C. Kiek padidėjo dujų molekulių vidutinė kinetinė energija?

(6,2 · 10^{-22} J)

9. Pagrindinė materijos savybė yra judėjimas. Pasiekus absoliutųjį nulį, medžiagą sudarančios molekulės ir atomai nustoja judėti. Ar tai neprieštarauja pagrindinei materijos savybei? Atsakymą pagrįskite.

Mokomės spręsti uždavinius

1. Apskaičiuokime idealiųjų dujų temperatūrą, kai vidutinė kinetinė jų energija lygi 7,87 · 10^{-21} J.

T – ?	$\overline{E_k} = 7{,}87 \cdot 10^{-21}$ J $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K

Sprendimas

Pasinaudojame lygtimi $\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$, kuri sieja molekulių judėjimo vidutinę kinetinę energiją ir temperatūrą. Iš jos išreiškiame temperatūrą:

$$T = \frac{2\overline{E_k}}{3k}.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$T = \frac{2 \cdot 7{,}87 \cdot 10^{-21}\ \text{J}}{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{J/K}} = 380\ \text{K}.$$

Atsakymas: 380 K.

Nagrinėdami Šterno bandymą (žr. 10.2 temą), sužinojote, kad molekulių greičius galima nustatyti bandymais. Remdamiesi šioje temoje išdėstyta medžiaga, molekulių greičius galime apskaičiuoti algebriniu būdu. Iliustruosime tai uždavinio pavyzdžiu.

2. Inde yra 0 °C temperatūros azoto dujų, kurių molio masė 0,028 kg/mol. Apskaičiuokime šių dujų molekulių vidutinį kvadratinį greitį.

$\bar{v}$ – ?	$T = 273$ K
	$M = 0{,}028$ kg/mol
	$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K

Sprendimas

Pagal (10.19) lygtį galima apskaičiuoti molekulių šiluminio judėjimo greičio kvadrato vidurkį, tereikia įrašyti į ją vienos molekulės vidutinės kinetinės energijos išraišką $\overline{E_k} = \dfrac{m_0 \overline{v^2}}{2}$:

$$\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

Iš čia išreiškiame greičio kvadrato vidurkį:

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m_0}.$$

Tada vidutinis kvadratinis greitis bus lygus

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Kadangi $m_0 = \dfrac{M}{N_A}$, tai vidutinis kvadratinis greitis

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kN_A T}{M}}.$$

Įrašę dydžių vertes, apskaičiuojame:

$$\overline{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{J/K} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}} \cdot 273\ \mathrm{K}}{0,028\ \mathrm{kg/mol}}} =$$

$$= 493\ \mathrm{m/s}.$$

Atsakymas: 493 m/s; algebriniu ir eksperimentiniu būdu apskaičiuotos dujų molekulių greičio vertės sutampa.

Užduotys savarankiškam darbui

1. Apskaičiuokite argono molekulių vidutinį kvadratinį greitį. Argono molio masė 0,04 kg/mol, temperatūra 0 °C. (412,5 m/s)

2. Apskaičiuokite idealiųjų dujų molekulių slenkamojo judėjimo vidutinę kinetinę energiją, esant 20 °C temperatūrai. ($6,06 \cdot 10^{-21}$ J)

3. Deguonies molekulių vidutinis kvadratinis greitis, esant 320 K temperatūrai, lygus 500 m/s. Remdamiesi šiais duomenimis, atlikite tokias užduotis:

a) kokybiškai įvertinkite deguonies molekulių greičio pokyčius kintant temperatūrai;

b) nurodytą temperatūrą išreikškite Celsijaus laipsniais;

c) apskaičiuokite deguonies molekulių slenkamojo judėjimo vidutinę kinetinę energiją; ($6,62 \cdot 10^{-21}$ J)

d) apskaičiuokite vienos deguonies molekulės masę. ($5,3 \cdot 10^{-26}$ kg)

4. Kokia turi būti anglies dioksido CO_2 temperatūra, kad jo molekulių vidutinis kvadratinis greitis būtų lygus 400 m/s? (282,4 K)

5. Dujos inde buvo praretintos vakuuminiu siurbliu. Jų slėgis pasidarė lygus $1,8 \cdot 10^{-10}$ Pa. Apskaičiuokite, kiek molekulių liko 1 cm^3 dujų. Dujų temperatūra 30 °C. ($4,3 \cdot 10^4$ molekulių)

6. Vienatomių dujų slėgis 40 kPa, o molekulių koncentracija $3 \cdot 10^{24}$ m^{-3}. Apskaičiuokite šių dujų molekulės vidutinę kinetinę energiją. ($2 \cdot 10^{-20}$ J)

7. Inde, kurio tūris 3,4 m^3, yra 2,6 kg azoto. Azoto slėgis $1,2 \cdot 10^5$ Pa. Apskaičiuokite:

a) azoto molekulių vidutinį kvadratinį greitį; (685 m/s)

b) vienos molekulės vidutinę slenkamojo judėjimo energiją. ($1,1 \cdot 10^{-20}$ J)

10.5. Idealiųjų dujų būsenos lygtis

Idealiųjų dujų būsenos lygtis

Idealiųjų dujų būseną (10.5.1 pav.) apibūdina šie makroskopiniai parametrai: slėgis p, tūris V ir temperatūra T. Lygtis, siejanti pagrindinius makroskopinius parametrus (p, V ir T), vadinama ***idealių̃jų dùjų bū́senos lygtimì***. Pirmiausia nustatykime dviejų parametrų: slėgio ir temperatūros, tarpusavio priklausomybę. Pasinaudokime molekulių koncentracijos išraiška

$$n = \frac{N}{V}; \tag{10.21}$$

čia N – dujų molekulių skaičius inde, V – indo tūris. Įrašę ją į (10.18) lygtį, gauname idealiųjų dujų slėgio priklausomybės nuo temperatūros išraišką:

$$p = nkT. \tag{10.22}$$

Joje nesunku įžvelgti dujų slėgio priklausomybę nuo molekulių koncentracijos. Antra vertus, čia slypi iš chemijos kurso žinomas Avogadro dėsnis: ***vienoduose tūriuose dujų, kurių temperatūra ir slėgis vienodi, yra tiek pat molekulių.*** Gauta dujų slėgio priklausomybe nuo molekulių koncentracijos ir temperatūros pasinaudosime išvesdami idealiųjų dujų būsenos lygtį.

Molekulių skaičių inde išreikškime medžiagos kiekio ν ir Avogadro skaičiaus N_A sandauga:

$$N = \nu N_A. \tag{10.23}$$

Iš (10.21), (10.22) ir (10.23) lygties išplaukia lygtis, siejanti tris makroskopinius parametrus – dujų slėgį, tūrį ir temperatūrą:

$$p = \frac{\nu N_A}{V} kT. \tag{10.24}$$

Bolcmano konstantos ir Avogadro skaičiaus sandauga vadinama ***universalių̃ja (mòline) dùjų konstánta R***:

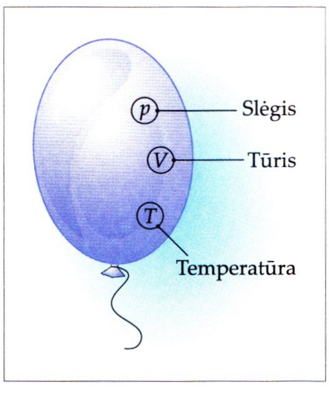
$$R = 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{J/K} \approx \approx 8{,}31\ \text{J/(mol} \cdot \text{K)}. \tag{10.25}$$

Pagrindinės sąvokos

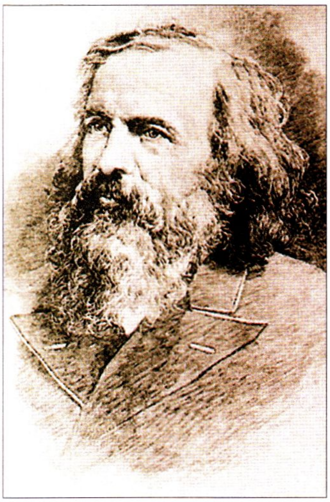
Idealių̃jų dùjų bū́senos lygtìs,

universalióji (mòlinė) dùjų konstánta.

10.5.1 pav.



Benua Klapeironas



Dmitrijus Mendelejevas

Į (10.24) lygtį vietoj kN_A įrašę universaliąją dujų konstantą R, gauname tokią dujų slėgio, tūrio ir temperatūros priklausomybės išraišką:

$$pV = \nu RT. \qquad (10.26)$$

Medžiagos kiekį ν išreiškę medžiagos masės m ir jos molio masės M santykiu, gauname ***idealių̃jų dùjų bū́senos lỹgtį***

$$pV = \frac{m}{M}RT. \qquad (10.27)$$

Ji dar vadinama Klapeirono ir Mendelejevo lygtimi. Šią lygtį galima taikyti bet kokios cheminės sudėties dujoms. Vienintelis dydis, priklausantis nuo dujų rūšies, šioje lygtyje yra dujų molio masė. Žinant du parametrus: p ir V arba p ir T, arba V ir T, pagal idealiųjų dujų būsenos lygtį nesunku rasti trečią parametrą: T, V arba p.

Idealiųjų dujų būsenos lygtis paaiškina dujų suspaudimo, plėtimosi, šildymo bei aušinimo procesus. Iš jos galima nustatyti, kaip susiję dviejų skirtingų būsenų dujų parametrai: slėgis, tūris ir temperatūra. Pirmosios būsenos dujų parametrus pažymėkime p_1, V_1, T_1, antrosios – p_2, V_2, T_2. Abiem būsenoms pritaikykime idealiųjų dujų būsenos lygtį:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{m}{M}R, \qquad \frac{p_2V_2}{T_2} = \frac{m}{M}R.$$

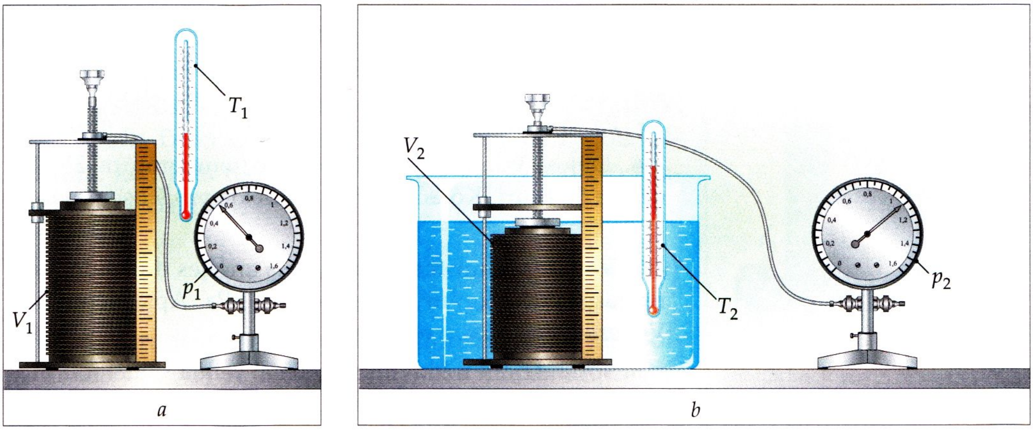
Kadangi dešiniosios lygybių pusės yra lygios, tai turi būti lygios ir kairiosios:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} = \text{const.} \qquad (10.28)$$

Šitaip užrašyta būsenos lygtis vadinama Klapeirono lygtimi. Ją pirmą kartą išvedė prancūzų fizikas Benua Klapeironas (*Benoit Clapeyron*, 1799–1864). (10.27) išraiška idealiųjų dujų būsenos lygtį pirmą kartą užrašė Dmitrijus Mendelejevas (1834–1907).

Idealiųjų dujų būsenos lygties tikrinimas bandymais

Idealiųjų dujų būsenos lygtį galima patikrinti bandymais. Gofruotas hermetiškas indas pripildomas dujų (10.5.2 pav., *a*). Jų slėgis p_1 matuojamas manomet-



10.5.2 pav.

ru, o tūris V_1 nustatomas pagal liniuotės, pritvirtintos prie indo, rodmenis. Pradinė dujų temperatūra lygi aplinkos temperatūrai T_1. Žinant parametrų p_1, V_1 ir T_1 vertes, apskaičiuojamas santykis $\frac{p_1V_1}{T_1}$.

Paskui dujų būsena pakeičiama (10.5.2 pav., *b*). Sumažinamas indo, o drauge ir dujų tūris. Naujos būsenos dujų tūris lygus V_2, o slėgis – p_2. Indas su dujomis įstatomas į indą su karštu vandeniu, kurio temperatūra T_2. Žinant naujų parametrų vertes, apskaičiuojamas santykis $\frac{p_2V_2}{T_2}$.

Įvertinus eksperimentinio įrenginio tikslumą, abu santykiai sutampa. Taigi idealiųjų dujų būsenos lygtis (10.28) yra teisinga.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname idealiųjų dujų būsenos lygtimi? Kam ji taikoma?

2. Kaip pakis dujų slėgis, kai jų tūrį sumažinsime 6 kartus, o temperatūrą padidinsime 2 kartus?

(Padidės 12 kartų)

3. Dujų slėgis lempoje 10^3 Pa, temperatūra 42 °C. Apskaičiuokite dujų molekulių koncentraciją.

($2{,}3 \cdot 10^{23}$ m^{-3})

4. Superdidelio vakuumo sąlygomis pasiekiamas 1 pPa slėgis. Apskaičiuokite, kiek molekulių yra 1 cm^3 tokio vakuumo, esant 27 °C temperatūrai. (241 molekulė)

5. Balionas, kurio tūris 0,1 m^3, pripildytas oro. Jo slėgis balione $5 \cdot 10^5$ Pa, o temperatūra 250 K. Kokį tūrį užimtų šis oras normaliomis sąlygomis, kai jo slėgis lygus 10^5 Pa, o temperatūra 0 °C? (0,546 m^3)

6. Dujos, kurių slėgis 150 kPa, o temperatūra 250 K, užima 50 l tūrį. Koks medžiagos kiekis yra šiose dujose? (3,6 mol)

7. Veneros atmosfera sudaryta iš anglies dioksido, kurio tankis 64,4 kg/m^3, o slėgis 9120 kPa. Apskaičiuokite Veneros paviršiaus temperatūrą. (750 K)

8. Sprendžiant uždavinius, dažnai reikia skaičiuoti oro molio masę. Apskaičiuokite ją, žinodami, kad oro tankis normaliomis sąlygomis lygus 1,29 kg/m^3. (0,029 kg/mol)

9. Apskaičiuokite, kiek oro molekulių yra ilgio $l = 8$ m, pločio $a = 4$ m ir aukščio $h = 3$ m kambaryje, kai temperatūra $t = 18$ °C, o slėgis $p = 0{,}97 \cdot 10^5$ Pa. ($2{,}35 \cdot 10^{27}$ molekulių)

10. Koks darbinio mišinio slėgis nusistovi automobilio variklio cilindruose, jeigu suspaudimo takto pabaigoje mišinio temperatūra pakyla nuo 50 °C iki 250 °C, o tūris sumažėja nuo 0,75 l iki 0,12 l? Pradinis mišinio slėgis buvo 80 kPa. (810 kPa)

10.6. Idealiųjų dujų būsenos lygties taikymas

Pagrindinės sąvokos

Izotèrminis vỹksmas, izotermà, izobãrinis vỹksmas, izobarà, izochòrinis vỹksmas, izochorà.

Vyksmai

Kai kurie procesai gamtoje ir technikoje (pavyzdžiui, šiluminiuose varikliuose) vyksta taip, kad vienas iš trijų parametrų (p, V, T), apibūdinančių dujų būseną, išlieka pastovus. Tokie procesai vadinami ***izobãriniu, izochòriniu*** ir ***izotèrminiu vyksmaĩs*** (gr. *isos* – lygus, vienodas). Jų metu dujų masė nekinta (m = const). Kiekybinę dviejų makroskopinių parametrų priklausomybę nusako dujų dėsniai. Visų jų autoriai – prancūzų mokslininkai.

Izoterminis vyksmas

Izotèrminiu vyksmù vadinamas pastovios masės dujų būsenos kitimas esant pastoviai temperatūrai ($T = \text{const}$). Tada iš idealiųjų dujų būsenos lygties išplaukia, kad tam tikros masės dujų slėgio ir tūrio sandauga yra pastovi:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \text{const}. \quad (10.29)$$

Šį dėsnį atrado prancūzų mokslininkai Robertas Boilis (*Robert Boyle*) ir Edmas Mariotas (*Edme Mariotte*), todėl jis dar vadinamas ***Bòilio ir Mariòto dė́sniu***. Jis teigia, kad ***tam tikros masės dujų slėgio ir tūrio sandauga yra pastovi, kai temperatūra nekinta:***

$$p_1V_1 = p_2V_2. \quad (10.30)$$

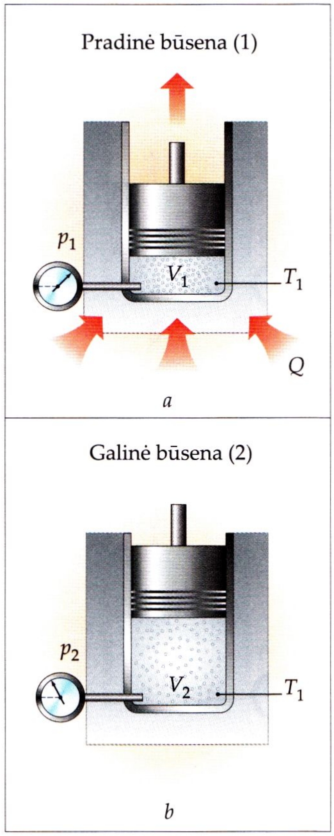
Boilio ir Marioto dėsnis tinka bet kurios rūšies dujoms, taip pat ir jų mišiniams.

Boilio ir Marioto dėsnį gamtoje įžvelgti nesunku. Pavyzdžiui, kylančių į vandens paviršių oro burbuliukų tūris didėja, nes slėgis vandens telkinio paviršiuje yra mažesnis negu dugne. Tačiau slėgio ir tūrio sandauga išlieka pastovi.

Boilio ir Marioto dėsnį galima patikrinti bandymais. Reikia pirmiausia išmatuoti cilindre esančių dujų pradinės būsenos (10.6.1 pav., *a*) parametrus: slėgį p_1 ir tūrį V_1. Tada dujas išretinti nekeičiant temperatūros (10.6.1 pav., *b*) ir išmatuoti naujos būsenos parametrus: slėgį p_2 ir tūrį V_2. Apskaičiavę sandaugas p_1V_1 ir p_2V_2, įsitikintume, kad jos yra lygios. Iš Boilio ir Marioto dėsnio galime padaryti išvadą, kad izoterminio vyksmo metu dujų slėgis yra atvirkščiai proporcingas jų tūriui:

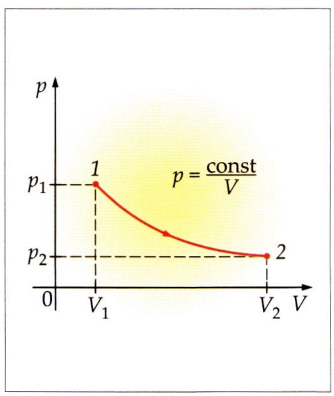
$$p = \frac{\text{const}}{V}. \quad (10.31)$$

Pavaizduokime šią priklausomybę grafiškai, abscisių ašyje atidėdami tūrio V vertes, ordinačių ašyje – slėgio p vertes. Gausime kreivę (10.6.2 pav.), kuri matematikoje vadinama hipèrbole (funkcijos $y = \frac{c}{x}$ grafikas yra hiperbolė). Fizikoje kreivė, vaizduojanti pastovios temperatūros dujų slėgio priklausomybę nuo tūrio, vadinama ***izotermà***.



10.6.1 pav.

10.6.2 pav.



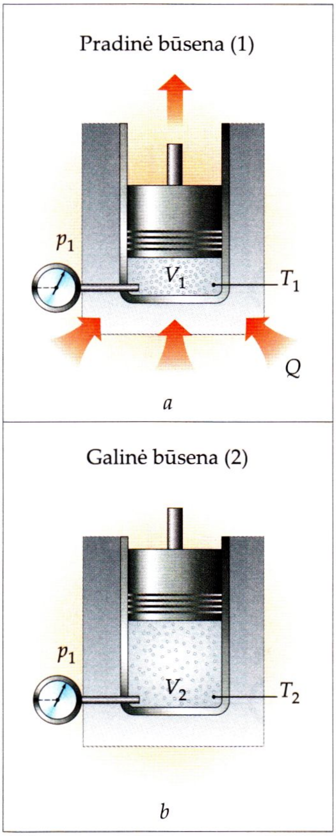
Izobarinis vyksmas

Izobãriniu vyksmù vadinamas pastovios masės dujų būsenos kitimas esant pastoviam slėgiui (p = const). Tada iš idealiųjų dujų būsenos lygties išplaukia, kad tam tikros masės dujų tūrio ir temperatūros santykis yra pastovus:

$$\frac{V}{T} = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{p} = \text{const}. \qquad (10.32)$$

Šį dėsnį atrado prancūzų mokslininkas Lui Žozefas Gei-Liusakas (*Louis Joseph Gay-Lussac*), todėl jis vadinamas ***Gei-Liusãko dė́sniu***. Jis teigia, kad ***tam tikros masės dujų tūrio ir temperatūros santykis yra pastovus, kai slėgis nekinta:***

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}. \qquad (10.33)$$



10.6.3 pav.

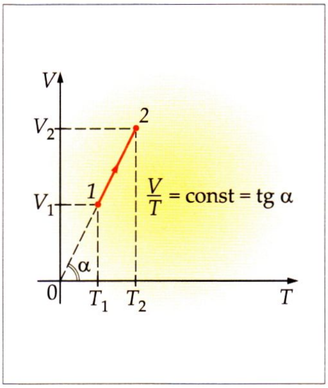
Gei-Liusako dėsnį taip pat galima patikrinti bandymais. 10.6.3 paveiksle pavaizduota tokio bandymo schema. Pradinę dujų būseną (10.6.3 pav., *a*) apibūdina parametrai V_1, p_1 ir T_1, galinę izobariškai išsiplėtusių dujų būseną (10.6.3 pav., *b*) – parametrai V_2, p_1 ir T_2. Kad, plečiantis dujoms, slėgis išliktų pastovus, dujas reikia šildyti.

Iš (10.32) formulės matyti, kad izobarinio vyksmo metu dujų tūris tiesiogiai proporcingas jų temperatūrai:

$$V = \text{const} \cdot T. \qquad (10.34)$$

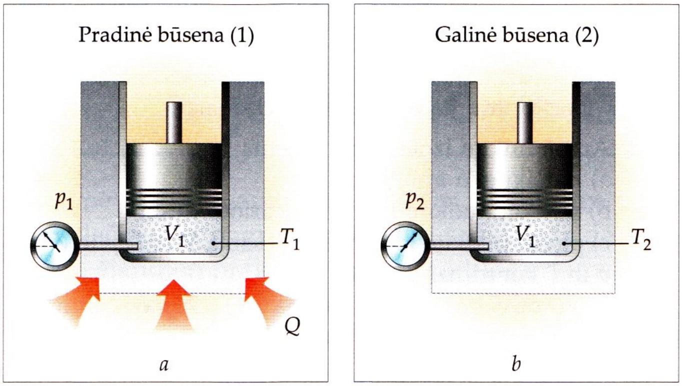
Tiesìnės priklausomýbės (t. y. funkcijos $y = kx$) grafikas yra tiesė̃. Fizikoje tiesė, vaizduojanti pastovaus slėgio dujų tūrio priklausomybę nuo temperatūros, vadinama ***izobarà*** (10.6.4 pav.). Krintant temperatūrai, dujų tūris mažėja. Jei T = 0, atrodytų, kad dujų tūris sumažėja iki nulio. Tačiau taip neįvyksta – atšaldytos dujos suskystėja, o skysčiams idealiųjų dujų dėsniai netinka.

10.6.4 pav.



Izochorinis vyksmas

Izochòriniu vyksmù vadinamas pastovios masės dujų būsenos kitimas esant pastoviam tūriui (V = = const). Tada iš idealiųjų dujų būsenos lygties iš-



10.6.5 pav.

plaukia, kad tam tikros masės dujų slėgio ir temperatūros santykis yra pastovus:

$$\frac{p}{T} = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{V} = \text{const.} \qquad (10.35)$$

Šį dėsnį atrado prancūzų mokslininkas Žakas Šarlis (*Jacquet Charles*), todėl jis vadinamas ***Šárlio dėsniu***. Jis teigia, kad ***tam tikros masės dujų slėgio ir temperatūros santykis yra pastovus, kai dujų tūris nekinta:***

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \qquad (10.36)$$

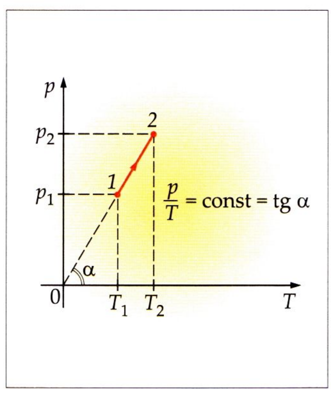
Šarlio dėsnį, kaip ir Gei-Liusako bei Boilio ir Marioto dėsnius, galima patikrinti bandymu. Jo schema pavaizduota 10.6.5 paveiksle. Pradinę dujų būseną (10.6.5 pav., *a*) apibūdina parametrai p_1, T_1 ir V_1, galinę izochoriškai pakaitintų dujų būseną (10.6.5 pav., *b*) – parametrai p_2, T_2 ir V_1. Bandymo rezultatai rodo, kad dujų slėgio ir temperatūros santykis yra pastovus.

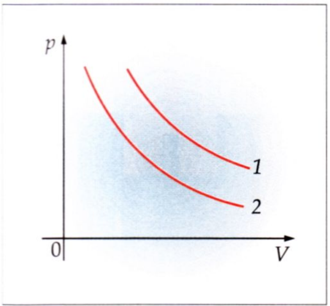
Izochorinio vyksmo metu dujų slėgio priklausomybė nuo temperatūros yra tiesinė:

$$p = \text{const} \cdot T. \qquad (10.37)$$

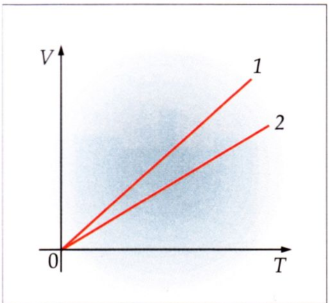
Tiesė, vaizduojanti pastovaus tūrio dujų slėgio priklausomybę nuo temperatūros, vadinama ***izochorà*** (10.6.6 pav.). Izochoros prasideda taške $T = 0$. Tai dar kartą patvirtina, kad absoliučiojo nulio temperatūroje dujų slėgis lygus nuliui.

10.6.6 pav.

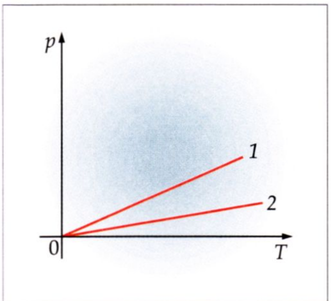




10.6.7 pav.

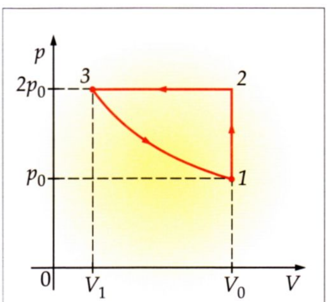


10.6.8 pav.



10.6.9 pav.

10.6.10 pav.



Klausimai ir užduotys

1. Kokie idealiųjų dujų būsenos kitimai vadinami izobariniu, izochoriniu ir izoterminiu vyksmais?

2. Apibūdinkite izoterminį vyksmą:
a) pateikite jo apibrėžimą;
b) suformuluokite Boilio ir Marioto dėsnį;
c) pavaizduokite izoterminį vyksmą V ir T, p ir V bei p ir T koordinačių sistemose;
d) nurodykite, kuri izoterma (10.6.7 pav.) atitinka aukštesnę dujų temperatūrą. Kodėl?

3. Apibūdinkite izobarinį vyksmą:
a) pateikite jo apibrėžimą;
b) suformuluokite Gei-Liusako dėsnį;
c) pavaizduokite izobarinį vyksmą V ir T, p ir V bei p ir T koordinačių sistemose;
d) nustatykite, kuri izobara (10.6.8 pav.) atitinka didesnį dujų slėgį. Kodėl?

4. Apibūdinkite izochorinį vyksmą:
a) apibrėžkite šį vyksmą;
b) suformuluokite Šarlio dėsnį;
c) pavaizduokite izochorinį vyksmą V ir T, p ir V bei p ir T koordinačių sistemose;
d) nurodykite, kuri izochora (10.6.9 pav.) atitinka didesnį dujų tūrį. Kodėl?

5. 2,24 l tūrio inde yra 1 mol dujų. Jų temperatūra 273 K. Apskaičiuokite šių dujų slėgį. ($1{,}01 \cdot 10^6$ Pa)

6. Vėsią rudens dieną, esant normaliam atmosferos slėgiui, Domantas atvažiavo į sodą. Pamatęs, kad sodo namelio kambaryje termometras rodo vos 10 °C, vaikinas užkūrė židinį. Po kurio laiko oras kambaryje sušilo ir jo temperatūra pakilo iki 25 °C. Žinodami, kad kambario tūris lygus 100 m^3, apskaičiuokite:
a) iš kambario išėjusio oro masę; (6,2 kg)
b) iš kambario išlėkusių molekulių skaičių. ($1{,}29 \cdot 10^{26}$)

7. 10.6.10 paveiksle pavaizduotas idealiųjų dujų būsenos kitimo grafikas. Remdamiesi juo, atlikite tokias užduotis:
a) įvardykite vyksmus, kurių metu dujų būsena pasikeičia iš *1* į *2*; iš *2* į *3*; iš *3* į *1*;
b) pavaizduokite šių dujų būsenos kitimą p ir T koordinačių sistemoje.

8. Pučiant muilo burbulą, didėja jo tūris, o kartu ir oro slėgis burbulo viduje. Ar šis reiškinys nepaneigia Boilio ir Marioto dėsnio? Atsakymą pagrįskite.

10.7. Skystieji kristalai ir jų naudojimas

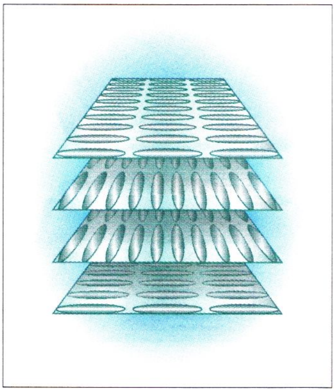
Šiame skyriuje aptarėme įvairias medžiagos būsenas. Plačiausiai nagrinėjome dujų savybes ir dėsnius. Tačiau šiandien praktiškai labai svarbios ir kitos būsenos medžiagos – skystieji kristalai. Dabar jau nieko nestebina kompiuterio vaizduoklis, pagamintas iš skystųjų kristalų (10.7.1 pav.), skystųjų kristalų televizoriaus ekranas. Šios medžiagos naudojamos laikrodžiuose, telefonuose, kitų prietaisų indikatoriuose, švieslentėse, termometruose, skaičiuokliuose ir kituose elektronikos prietaisuose. Kas yra skystieji kristalai?

Sandaros požiūriu jie panašūs ir į skysčius, ir į kietuosius kūnus. Skystieji kristalai – tai medžiagos, sudarytos iš pailgų molekulių, kurioms tam tikrame temperatūros intervale būdingas takumas (kaip ir skysčiams) bei tvarkingas molekulių išsidėstymas (kaip kristalams). Skystųjų kristalų molekulės dažniausiai išsidėsto lygiagrečiais sluoksniais, tačiau kiekviename jų – vis kitaip (10.7.2 pav.). Dėl tokios vidinės sandaros fizinės skystųjų kristalų savybės įvairiomis kryptimis yra nevienodos.

Skystųjų kristalų atradimo istorija dar kartą patvirtina, kad skirtingi gamtos mokslai (fizika ir biologija) susiję tarpusavyje. Botaniko Roberto Brauno darbų reikšmę molekulinės kinetinės dujų teorijos raidai jau minėjome. Skystuosius kristalus 1888 m. atrado taip

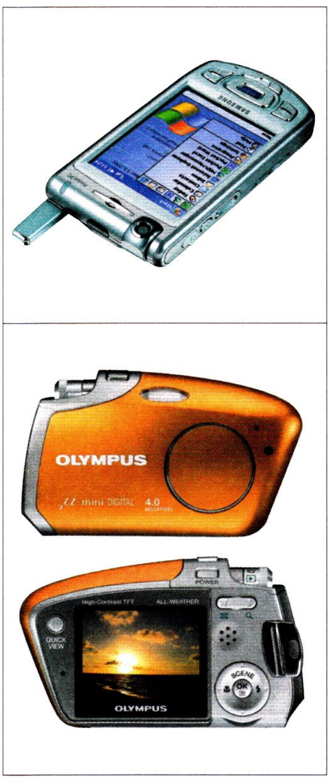
10.7.1 pav.

10.7.2 pav.



10.7.3 pav.

10.7.4 pav.



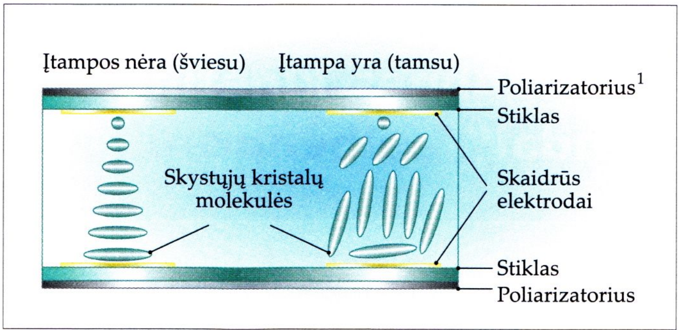
pat botanikas. Tai buvo austrų mokslininkas Frydrichas Rainiceris (*Friedrich Rheinitzer*). Skystieji kristalai ilgą laiką nebuvo tyrinėjami. Jais susidomėta tik 1960 m. Amerikiečių mokslininkas Richardas Viljamsas (*Richard Williams*), dirbęs RCA (*Radio Corporation of America*) firmoje, 1963 m. pastebėjo, kad, paveikus skystąjį kristalą elektriniu lauku, šviesos sklidimas per jį pakinta. Taigi elektriniu lauku galima keisti ir valdyti molekulių išsidėstymą kristale. Po penkerių metų kitas RCA tyrinėtojas Georgas Hylmejeris (*Georg Heilmeyer*) su savo kolegomis pagamino pirmąjį skystųjų kristalų ekrano prototipą. Skystųjų kristalų molekulės reaguoja ne tik į elektrinio lauko poveikį, bet ir į nedidelius slėgio bei temperatūros pokyčius. Dėl to keičiasi šių kristalų skaidrumas ir spalva.

Skystųjų kristalų ekranai turi privalumų ir trūkumų. Svarbiausias jų privalumas, palyginti su standartiniais ekranais, yra maži matmenys. Dėl to šie ekranai įrengiami kompiuteriniuose grotuvuose (10.7.3 pav.), skaitmeniniuose fotoaparatuose (10.7.4 pav.) ir kituose prietaisuose.

Tradiciniai televizoriai ar kompiuterių vaizduokliai turi kineskopus, todėl yra dideli ir sunkūs. Skystųjų kristalų ekranai yra vos kelių centimetrų storio ir dėl to daug lengvesni. Jie vartoja gerokai mažiau energijos nei vaizduokliai su katodinių spindulių kineskopu.

Tačiau skystųjų kristalų ekranai turi ir trūkumų. Pirma, jie brangesni už standartinius, antra, vaizdo kokybė skystųjų kristalų ekrane priklauso nuo regėjimo kampo. Optimalus regėjimo kampas šiuose ekranuose yra status (vartotojas sėdi tiesiai prieš ekraną). Pasukus ekraną, vaizdas jame įžiūrimas sunkiau.

Vaizdo kokybė skystųjų kristalų ekrane labiausiai priklauso nuo ekrano tipo ir dydžio. Skystųjų kristalų ekranai, kitaip nei standartiniai, patys šviesos neskleidžia. Jie tik atspindi saulės ar kambario šviesą. Vis dėlto paviršiaus apšvieta ne visada yra pakankama, todėl šiuo metu kuriami skystųjų kristalų ekranai, kurie apšviečiami iš šonų (šviesos šaltiniai tvirtinami prie ekrano kraštų) arba iš apačios, po ekranu įtaisytu šviesos šaltiniu. Ekranai gali būti įvairių tipų ir formų.



10.7.5 pav.

Kaip sudarytas skystųjų kristalų ekranas? Aptarkime vieną jo tipą (10.7.5 pav.). Šio ekrano ląstelė yra darinys, pripildytas medžiagos, turinčios skysčio ir kristalo savybių. Priešingose ląstelės pusėse išdėstyti skaidrūs elektrodai, prie kurių jungiamas įtampos šaltinis. Ekrano ląstelės skaidrumas reguliuojamas keičiant molekulių orientacijos kampą, priklausantį nuo ląstelės elektrodams tiekiamos įtampos.

Spalvotiems vaizdams kurti atskirose skystųjų kristalų ekranų ląstelėse naudojami spalvų filtrai. Jie dažniausiai daromi vertikalių raudonų, žalių ir mėlynų juostelių pavidalo, tačiau gali būti ir kitokie. Kad ekrane susidarytų baltas taškas, gretimos trys skystųjų kristalų ekranų ląstelės turi praleisti šviesą. Spalvų pustoniai kuriami įvairiais būdais: silpninant ląstelei tiekiamą srovę ir taip mažinant praleidžiamos šviesos kiekį; trumpam įjungiant ir išjungiant ląstelę ir kt.

Paprastesnių tipų ekranuose nepavyksta visų ląstelės molekulių orientuoti vertikaliai, todėl ekranas šiek tiek praleidžia šviesą ir jame vietoj juodo taško matomas pilkas. Tai apriboja vaizdo ekrane kontrastą ir regėjimo kampą (tik 90°). Vaizdo kokybei pagerinti ekranas padengiamas specialia plėvele, kuri padidina regėjimo kampą iki 140°.

Spalvoti skystųjų kristalų ekranai dabar plačiai naudojami kompiuterių vaizduokliuose bei televizoriuose. Tačiau tobulinamos ir kitos ekranų gamybos technologijos. Jų pagrindu pagaminti ekranai turi daug privalumų, palyginti su dabar dominuojančiais skystųjų kristalų ekranais: paprastesnė gamybos technologija, didelis skaistis, plati spalvų gama, didelė skiriamoji geba, geras regėjimo kampas.

[1] Poliarizãtoriumi vadinamas iš tam tikrų medžiagų pagamintas stiklas, keičiantis šviesos struktūrą.

Skyriaus „Molekulinės kinetinės teorijos pagrindai“ apibendrinimas

Šiluminis judėjimas	Kūną sudarančių dalelių netvarkingas judėjimas vadinamas šiluminiu judėjimu.
Šiluminiai reiškiniai	Fizikiniai reiškiniai, priklausantys nuo atomų ir molekulių šiluminio judėjimo, vadinami šiluminiais reiškiniais. Juos nagrinėja: • molekulinė kinetinė teorija, grindžiama nuostata, kad visi kūnai sudaryti iš netvarkingai judančių dalelių; • termodinamika, kuri remiasi energijos tvermės dėsniu ir neatsižvelgia į vidinę medžiagos sandarą.
Pagrindiniai molekulinės kinetinės teorijos teiginiai	1. Kūnai sudaryti iš dalelių: atomų, molekulių, jonų. 2. Medžiagas sudarančios dalelės nuolat ir netvarkingai juda. 3. Kūną sudarančios dalelės tarpusavyje sąveikauja.
Molis	Molis – toks medžiagos kiekis, kuriame molekulių arba atomų yra tiek pat, kiek ir 12 g anglies (^{12}C). Dalelių skaičius viename molyje vadinamas Avogadro skaičiumi: $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}.
Molio masė	Molio mase M vadinama medžiagos vieno molio masė: $M = m_0 N_A$; $[M] = 1$ kg/mol.
Medžiagos kiekis	Medžiagos kiekis ν lygus tam tikro kūno molekulių skaičiaus N ir Avogadro skaičiaus N_A santykiui, t. y. molekulių skaičiui viename molyje: $\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$; $[\nu] = 1$ mol.

Santykinė molekulinė masė	Santykine molekuline mase M_r vadinamas medžiagos molekulės masės m_0 ir $\frac{1}{12}$ anglies atomo masės m_{0C} santykis: $$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}.$$
Brauno judėjimas	Skysčiuose (arba dujose) esančių dalelių šiluminis judėjimas vadinamas Brauno judėjimu.
Difuzija	Difuzija – savaiminis skirtingų medžiagų maišymasis.
Molekulių sąveikos jėgos	Medžiagos molekulės veikia viena kitą traukos ir stūmos jėgomis. Jos priklauso nuo atstumo tarp molekulių: • kai jis 2–3 kartus didesnis už molekulės skersmenį, molekulės veikia viena kitą traukos jėgomis; • kai jis lygus dviejų molekulių spindulių sumai, traukos jėgos susilygina su stūmos jėgomis ir jėgų atstojamoji lygi nuliui; • kai jis mažesnis už dviejų molekulių spindulių sumą, molekulės veikia viena kitą stūmos jėgomis.
Idealiosios dujos	Idealiosios dujos yra fizikinis dujų modelis, kuriam būdingos šios savybės: • molekulių tūris yra labai mažas, palyginti su indo tūriu; • molekulių neveikia traukos jėgos; • molekulių judėjimo energija daug didesnė už sąveikos energiją; • molekulių stūmos jėgos atsiranda tik tada, kai molekulės susiduria viena su kita arba su indo sienelėmis; • molekulių smūgiai yra tamprūs.
Molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinė lygtis	Idealiųjų dujų slėgis yra tiesiogiai proporcingas molekulės masės, molekulių skaičiaus tūrio vienete ir molekulių greičio kvadrato vidurkio sandaugai: $$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}.$$

Idealiųjų dujų būsenos lygtis	Lygtis, siejanti pagrindinius makroskopinius parametrus p, V ir T, apibūdinančius dujų būseną, vadinama idealiųjų dujų būsenos lygtimi: $$pV = \frac{m}{M}RT;$$ čia p – idealiųjų dujų slėgis, V – tūris, m – masė, M – molio masė, R – universalioji dujų konstanta (R =8,31 J/(mol · K)), T – absoliučioji temperatūra.
Temperatūra	Netvarkingai judančių molekulių slenkamojo judėjimo vidutinė kinetinė energija yra tiesiogiai proporcinga absoliučiajai temperatūrai: $$\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT;$$ čia $\overline{E_k}$ – molekulių vidutinė kinetinė energija, k – Bolcmano konstanta (k = 1,38 · 10^{-23} J/K), T – absoliučioji temperatūra.
Absoliučioji, arba termodinaminė, temperatūros skalė	Temperatūros skalė, sudaryta neatsižvelgiant į dujų ar skysčio rūšį, vadinama absoliučiąja, arba termodinamine, temperatūros skale, kartais – Kelvino skale. Ji sudaroma remiantis lygtimi $$\frac{pV}{N} = kT.$$ Absoliučiosios temperatūros skalės vienetas kelvinas (K) prilyginamas Celsijaus skalės laipsniui (°C): $$1\ \text{K} = 1\ ^\circ\text{C}.$$
Izoterminis vyksmas	Izoterminiu vyksmu vadinamas pastovios masės dujų būsenos kitimas esant pastoviai temperatūrai (T=const).
Boilio ir Marioto dėsnis	Tam tikros masės dujų slėgio ir tūrio sandauga yra pastovi, kai temperatūra nekinta: $$p_1V_1=p_2V_2.$$ Kreivė, vaizduojanti pastovios temperatūros dujų slėgio priklausomybę nuo tūrio, vadinama izoterma.

Izobarinis vyksmas	Izobariniu vyksmu vadinamas pastovios masės dujų būsenos kitimas esant pastoviam slėgiui (p=const).
Gei-Liusako dėsnis	Tam tikros masės dujų tūrio ir temperatūros santykis yra pastovus, kai slėgis nekinta: $$\frac{V_1}{T_1}=\frac{V_2}{T_2}.$$ Tiesė, vaizduojanti pastovaus slėgio dujų tūrio priklausomybę nuo temperatūros, vadinama izobara.
Izochorinis vyksmas	Izochoriniu vyksmu vadinamas pastovios masės dujų būsenos kitimas esant pastoviam tūriui (V=const).
Šarlio dėsnis	Tam tikros masės dujų slėgio ir temperatūros santykis yra pastovus, kai dujų tūris nekinta: $$\frac{p_1}{T_1}=\frac{p_2}{T_2}.$$ Tiesė, vaizduojanti pastovaus tūrio dujų slėgio priklausomybę nuo temperatūros, vadinama izochora.

Šiluminiai reiškiniai

11 Termodinamika

Šiame skyriuje sužinosite, kas yra vidinė kūnų energija, kaip termodinamikoje suprantamas darbas, prisiminsite IX klasėje nagrinėtą šilumos kiekio sąvoką, susipažinsite su pagrindiniais termodinamikos dėsniais, galiausiai nagrinėsite bendruosius šiluminių mašinų veikimo principus, mokysitės skaičiuoti šiluminės mašinos naudingumo koeficientą, gvildensite šiluminių mašinų keliamas ekologines problemas.

11.1. Vidinė kūnų energija. Šilumos kiekis

Pagrindinės sąvokos

Vidìnė enèrgija,
šilumõs pérdavimas,
šilumõs apýkaita,
šilumõs kiẽkis,
savitóji šilumà.

Vidinės energijos samprata

Vidinė energija – vienas svarbiausių termodinamikos dydžių. Norėdami atskleisti jo esmę, turime prisiminti, kaip apibrėžėme mechaninę energiją. Sakėme, kad tai – kūno galimybė atlikti darbą. Ji gali būti dviejų rūšių: kinetinė ir potencinė. Pavyzdžiui, krintantis nuo stalo kamuoliukas turi kinetinės (judėjimo) ir potencinės (sąveikos) energijos.

Molekulinė kinetinė teorija teigia, kad visi kūnai sudaryti iš dalelių, kurios netvarkingai juda ir tarpusavyje sąveikauja. Vadinasi, kūną sudarančios dalelės turi kinetinės (judėjimo) ir potencinės (sąveikos) energijos. Visų kūną sudarančių dalelių judėjimo ir sąveikos energija yra vidinė kūno energija. ***Vidinė kūno energija lygi tą kūną sudarančių dalelių (molekulių arba atomų) netvarkingo judėjimo kūno masės centro atžvilgiu kinetinių energijų ir visų dalelių tarpusavio sąveikos potencinių energijų sumai.***

Mokydamiesi mechanikos, sužinojote, kaip galima apskaičiuoti pilnutinę mechaninę kūno energiją. Reikia rasti kūno kinetinę ir potencinę energiją ir jas sudėti. Tokiu būdu apskaičiuoti vidinę kūno energiją nepavyks, nes, pirma, nuolat kinta kūną sudarančių dalelių išsidėstymas, taigi ir jų sąveikos energija; antra, nuolat kinta dalelių greitis; trečia, kūnus sudaro labai daug dalelių. Vidinę kūno energiją galima išreikšti makroskopiniais jo parametrais.

Idealiųjų dujų vidinė energija

Idealiųjų dujų molekulės tarpusavyje nesąveikauja, todėl potencinė jų energija lygi nuliui. Vadinasi, visą idealiųjų dujų vidinę energiją sudaro molekulių šiluminio judėjimo kinetinė energija.

Nagrinėkime vienatomes idealiąsias dujas, kurias sudaro ne molekulės, o atskiri atomai. Prie šių dujų

priskiriamas argonas, neonas, helis ir kitos inertinės dujos. Vienatomių dujų atomų judėjimas yra paprastesnis, mat jie tik slenka, bet nesisuka, kaip sudėtingesnių dujų molekulės.

Norint rasti vienatomių idealiųjų dujų vidinę energiją, reikia vieno atomo vidutinę energiją padauginti iš atomų skaičiaus. Vieno atomo vidutinė energija $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$, o atomų skaičius $N = N_A \frac{m}{M}$. Tada idealiųjų dujų vidinė energija U išreiškiama taip:

$$U = \bar{E}N = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT. \quad (11.1)$$

Iš (11.1) formulės matyti, kad ***idealiųjų vienatomių dujų vidinė energija yra tiesiogiai proporcinga jų absoliučiajai temperatūrai.***

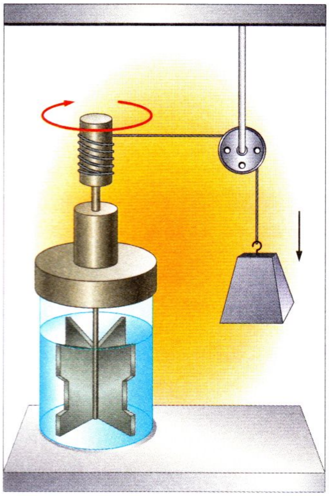
Atsižvelgus į dujų būsenos lygtį, idealiųjų dujų vidinę energiją galima išreikšti formule

$$U = \frac{3}{2} pV. \quad (11.2)$$

Tačiau idealiųjų dujų vidinė energija priklauso tik nuo temperatūros. Nuo tūrio ji nepriklauso, nes idealiųjų dujų molekulių sąveikos potencinė energija lygi nuliui. Realiųjų dujų vidinė energija priklauso ne tik nuo temperatūros T, bet ir nuo dujų tūrio V. Kai dujos užima nevienodą tūrį, skiriasi atstumai tarp molekulių, taigi ir jų sąveikos energija.

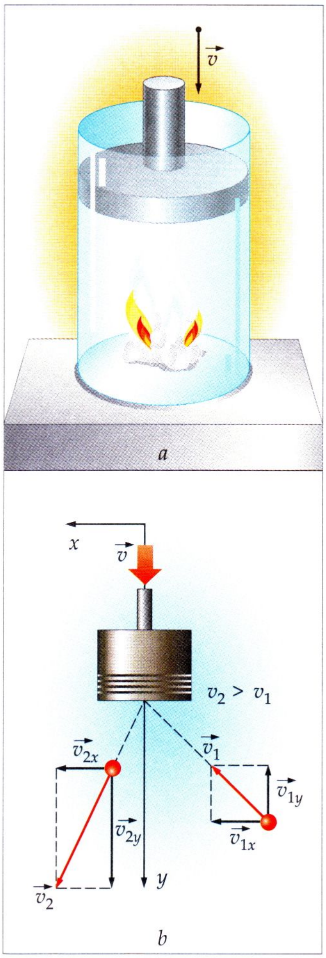
Skysčių ir kietųjų kūnų molekulių sąveikos energija artima jų judėjimo energijai. Vadinasi, skysčių ir kietųjų kūnų vidinė energija taip pat priklauso nuo tūrio. Apskritai vidinė kūnų energija priklauso ne tik nuo temperatūros, bet ir nuo tūrio ($U = f(T, V)$).

Kokios yra vidinės energijos atsargos? Įvertinkime klasėje esančio oro vidinę energiją. Tarkime, kad klasės tūris yra 160 m^3, atmosferos slėgis normalus ($p = 1{,}01 \cdot 10^5$ Pa). Atsižvelgdami į tai, kad oras susideda daugiausia iš azoto N_2 ir deguonies O_2, apskaičiuojame vidinę jo energiją. Gauname $4{,}04 \cdot 10^7$ J. Tiek energijos pakaktų pakrautam lėktuvui „Boeing 747“ pakelti į 20 m aukštį. Taigi vidinės energijos atsargos yra didžiulės, tačiau ją ne visada galima paversti mechaniniu darbu.



11.1.1 pav.

11.1.2 pav.



Vidinės energijos kitimas

Vidinę kūnų energiją galima pakeisti dviem būdais: atliekant darbą ir perduodant šilumą.

Atliekant darbą, padidinama kūno temperatūra, o kartu ir vidinė energija. Pavyzdžiui, sukant menteles, skysčio vidinė energija didėja (11.1.1 pav.). Staiga suslegiant orą cilindre (11.1.2 pav., *a*), temperatūra jame pakyla tiek, kad vatos gumulėlis užsidega. Temperatūros padidėjimas byloja apie tai, kad padidėjo vidinė oro energija. Slegiant cilindre esantį orą, jo molekulių greitis didėja (11.1.2 pav., *b*), o dėl to didėja ir vidinė oro energija.

Šilumos kiekis

Vidinę dujų energiją galima pakeisti, dujas ne tik slegiant, bet ir kaitinant (11.1.3 pav.). Kai stūmoklis yra įtvirtintas, kaitinamų dujų tūris nekinta, o temperatūra ir vidinė energija didėja. Vidinės energijos pokytis ΔU lygus galinės energijos U_2 ir pradinės energijos U_1 skirtumui:

$$\Delta U = U_2 - U_1. \qquad (11.3)$$

11.1.3 paveiksle pavaizduotas dujų kaitinimo reiškinys vadinamas šilumos perdavimu. Šiuo būdu mus pasiekia Saulės energija, kaista vanduo puode, stiklinė, pripilta karštos arbatos, ir pan. ***Vieno kūno energijos perdavimas kitam kūnui neatliekant darbo vadinamas šilumõs pérdavimu, arba šilumõs apýkaita.*** Žinote šiuos šilumos perdavimo būdus: šilumõs laidùmą, spinduliãvimą ir konvèkciją.

Vidinės energijos dalis, kuri pereina iš vieno kūno į kitą šilumos perdavimo būdu, vadinama šilumõs kiekiù Q. Vadinasi, šilumos kiekiu (trumpiau – šìluma) vadinama iš vieno kūno į kitą sklindanti vidinė energija. Jei kūnas šilumos kiekį Q atiduoda, jo vidinė energija mažėja, todėl

$$\Delta U = -Q. \qquad (11.4)$$

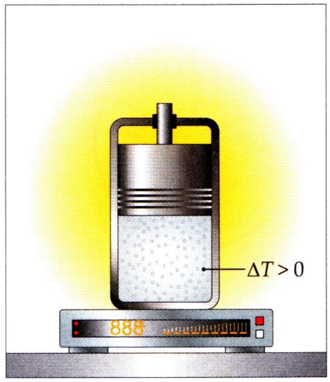
Šilumos kiekis, kaip ir energija, matuojamas *džáuliais* (J). Anksčiau jis buvo matuojamas kalòrijomis (1 cal = 4,187 J).

Vėsdamas kūnas atiduoda šilumą aplinkai. Kadangi vėstančio kūno galinė temperatūra yra mažesnė už pradinę, tai jo atiduotas šilumos kiekis neigiamas.

Mokydamiesi fizikos IX klasėje, sužinojote, kaip apskaičiuojamas šilumos kiekis, kurio reikia masės m kūno temperatūrai pakelti nuo t_1 iki t_2:

$$Q = cm(t_2 - t_1). \qquad (11.5)$$

Norint apskaičiuoti kūno atiduotą arba gautą šilumos kiekį, reikia žinoti to kūno savitąją šilumą c. Kūno ***savitóji šilumà*** yra toks šilumos kiekis, kurį reikia suteikti 1 kg medžiagos, kad jos temperatūra pakiltų 1 K. Skirtingų medžiagų savitoji šiluma yra nevienoda. Jos vertės dažniausiai pateikiamos žinynuose arba uždavinynų prieduose. Pavyzdžiui, sidabro savitoji šiluma lygi 250 J/(kg · K), stiklo – 840 J/(kg · K). Vadinasi, jeigu 1 kg masės sidabrinį ir stiklinį kūną pakaitintume 1 K, tai stiklinio kūno vidinė energija padidėtų 840 J, o sidabrinio – 250 J.



11.1.3 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname vidine kūno energija?

2. Ar vidinė kūno energija priklauso nuo kūno judėjimo arba jo padėties kitų kūnų atžvilgiu? Atsakymą pagrįskite.

3. Kokiais makroskopiniais parametrais galima išreikšti vidinę kūno energiją? Nuo kokių makroskopinių parametrų priklauso idealiųjų dujų, skysčių ir kietųjų kūnų vidinė energija?

4. Kaip pakinta kūno temperatūra, jeigu jis energijos atiduoda daugiau nei gauna?

5. Kam lygi vienatomių idealiųjų dujų vidinė energija?

6. Kaip ir kiek pakinta idealiųjų dujų vidinė energija, jeigu jų tūris padidėja 3 kartus, o slėgis sumažėja 6 kartus?

7. Kaip ir kiek pakinta idealiųjų dujų vidinė energija, jeigu jų slėgis yra pastovus, o tūris sumažėja 6 kartus?

8. Kokiais būdais galima keisti vidinę kūnų energiją?

9. Kodėl slegiamos dujos įkaista?

10. Pateikite šilumos laidumo, konvekcijos ir spinduliavimo pavyzdžių.

11. Ką vadiname šilumos kiekiu? Kokiais vienetais jis matuojamas?

12*. 87 kg oro šildomi nuo 10 °C iki 30 °C. Oro molio masė $2{,}9 \cdot 10^{-2}$ kg/mol. Tardami, kad oras yra dviatomės dujos, apskaičiuokite, kiek pakito vidinė oro energija.

(1,25 MJ)

13. Fizikos kabineto tūris 140 m^3, atmosferos slėgis normalus.

a) Apskaičiuokite visų fizikos kabinete esančių oro molekulių šiluminio judėjimo kinetinę energiją. ($2{,}1 \cdot 10^7$ J)

b) Nustatykite, kiek vandens būtų galima sušildyti nuo 0 °C iki 100 °C, panaudojant šią energiją. (50 kg)

11.2. Faziniai virsmai

Pagrindinės sąvokos

Fãzinis vir̃smas, garãvimas, virìmo temperatūrà, savitóji garãvimo šilumà, kondensãcija, lýdymasis, savitóji lýdymosi šilumà, kietéjimas.

Faziniai virsmai

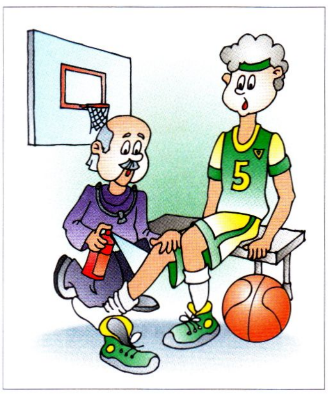
IX klasėje nagrinėdami šiluminius reiškinius, aptarėte įvairias medžiagų būsenas ir jų kitimus: lydymąsi ir kietėjimą, garavimą ir kondensaciją. Medžiagos būsenos fizikoje dar vadinamos ***fãzėmis***, o jų kitimas – ***fãziniu virsmù***.

Remdamiesi molekuline kinetine teorija ir vidinės energijos samprata, išnagrinėsime šiuos fazinius virsmus: garavimą, kondensaciją, lydymąsi ir kietėjimą. Prisiminsime, kaip apskaičiuojamas jiems vykstant išsiskyręs arba sunaudotas šilumos kiekis.

Garavimas

Garãvimu vadinamas toks fazinis virsmas, kurio metu skystis virsta garais jo paviršiuje. Garuojant skysčiui, iš jo išlekia molekulės, kurių kinetinė energija yra didesnė už potencinę (sąveikos su kitomis molekulėmis) energiją. Garuoja bet kokios temperatūros skystis, nes jame visada yra molekulių, kurių kinetinė energija didesnė už vidutinę kinetinę energiją (lygią $\frac{3}{2}kT$). Kylant temperatūrai, iš skysčio išlekia vis daugiau molekulių. Kadangi ištrūksta pačios greičiausios, tai skysčio molekulių vidutinė kinetinė energija, o kartu ir skysčio temperatūra mažėja. Tai turi praktinę reikšmę. Pavyzdžiui, lakiu skysčiu patepta skausminga kūno vieta (11.2.1 pav.) atšąla ir skausmas aprimsta. Išsimaudę ežere ar upėje ir išlipę ant kranto, jaučiame šaltį, nes nuo mūsų kūno paviršiaus garuoja vanduo.

11.2.1 pav.



Garuoja bet kurios temperatūros skystis. Kylant temperatūrai, garavimas intensyvėja, o ypač intensyviai garuoja verdantis skystis. Temperatūra, kurioje skystis verda, vadinama ***virìmo temperatūrà***[1].

Šilumos kiekis, reikalingas skysčiui išgarinti jo virimo temperatūroje, yra tiesiogiai proporcingas išgarintų molekulių skaičiui arba bendrai jų masei:

$$Q = Lm; \quad (11.6)$$

čia L – savitoji garavimo šiluma. Šis šilumos kiekis sunaudojamas skysčio molekulių ryšiams nutraukti. ***Savitą̃ja garãvimo šì̃luma vadinamas šilumos kiekis, reikalingas 1 kg skysčio išgarinti virimo temperatūroje.*** Jos matavimo vienetas yra *džáulis kilogrãmui*:

$$[L] = 1\ \mathrm{J/kg}.$$

Pavyzdžiui, vandens savitoji garavimo šiluma lygi $2{,}256 \cdot 10^6$ J/kg. Vadinasi, 1 kg vandens išgarinti reikia $2{,}256 \cdot 10^6$ J energijos. Tai labai didelis kiekis.

Žemėje nuolat garuoja jūrų ir vandenynų paviršius. Per metus Žemėje išgaravusio vandens masė prilygsta Juodosios jūros vandens masei.

11.2.2 pav.

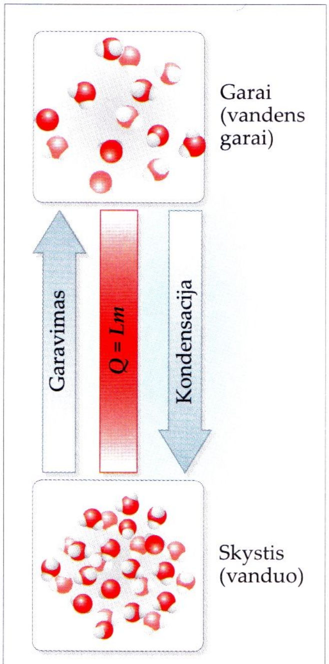
Kondensacija

Kondensãcija (lot. *condensatio* – sutirštinimas) vadinamas fazinis virsmas, kurio metu garai virsta skysčiu. Dažniausiai matoma vandens garų kondensacija. Dalis netvarkingai judančių vandens molekulių grįžta atgal į skystį (11.2.2 pav.), todėl skysčio vidinė energija didėja. Šilumos kiekis, kurį skystis gauna dėl kondensacijos, lygus šilumos kiekiui, kurio reikia skysčiui išgarinti. Kondensuojantis garams išsiskiriantis šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal tą pačią (11.6) formulę, tik šiuo atveju jis yra neigiamas:

$$Q = -Lm. \quad (11.7)$$

Garavimas ir kondensacija schemiškai pavaizduota 11.2.3 paveiksle.

11.2.3 pav.



Didžiulius energijos nuostolius Žemės paviršiuje kompensuoja energija, išsiskirianti kondensacijos metu: susidarant debesims, rūkui, rasai, krituliams.

[1] Plačiau apie virimo procesą ir virimo temperatūrą kalbėsime 12.2 temoje.

Lydymasis

Lýdymasis yra toks fazinis virsmas, kurio metu kietasis kūnas virsta skysčiu. Temperatūra, kurioje kietasis kūnas suskystėja, vadinama ***lýdymosi temperatūrà***. Skirtingų medžiagų ji yra nevienoda. Pavyzdžiui, galis (Ga) lydosi įkaitęs iki 29,8 °C, alavas – iki 232 °C, o geležis – iki 1539 °C.

Lydymąsi galima paaiškinti molekulinės kinetinės teorijos požiūriu. Tvarkingai išsidėsčiusios kietojo kūno molekulės svyruoja apie pusiausvyros padėtį. Kylant kūno temperatūrai, kinetinė molekulių svyravimo energija ir svyravimo amplitudė didėja. Pasiekus lydymosi temperatūrą, kinetinės energijos molekulėms pakanka, kad jos galėtų pereiti iš vienos pusiausvyros padėties į kitą. Kadangi kietojo kūno molekulės išsidėsčiusios tvarkingai, jų tarpusavio sąveikos jėgos yra apytiksliai vienodos, todėl molekulių ryšiai nutrūksta iš karto visame kūne.

Šilumos kiekis, kurį gauna lydomas kūnas, naudojamas molekulių ryšiams nutraukti, t. y. molekulių potencinei energijai didinti. Molekulių judėjimo (kinetinė) energija, o kartu ir kūno temperatūra lydymosi metu nekinta.

Norint išlydyti didesnės masės kūną, reikia jam suteikti daugiau šilumos. Šilumos kiekis, reikalingas masės m kūnui išlydyti, išreiškiamas formule

$$Q = \lambda m; \qquad (11.8)$$

čia λ – savitoji lydymosi šiluma. ***Savitą́ja lýdymosi šìluma vadinamas šilumos kiekis, reikalingas 1 kg kietos medžiagos paversti skysčiu jos lydymosi temperatūroje.*** Savitosios lydymosi šilumos, kaip ir savitosios garavimo šilumos, matavimo vienetas yra džaulis kilogramui:

$$[\lambda] = 1\ \mathrm{J/kg}.$$

Kietėjimas

Kietė́jimas yra fazinis virsmas, kurio metu skystis virsta kietuoju kūnu.

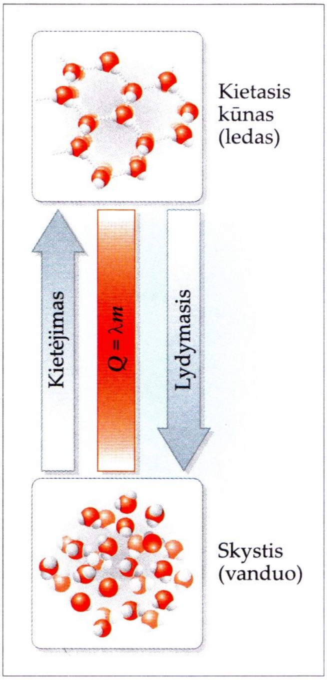
Norėdami suprasti kietėjimą, prisiminkime skysčio sandarą. Tankiai išsidėsčiusios skysčio molekulės svyruoja apie pusiausvyros padėtį. Tačiau kai kurios jų turi pakankamai kinetinės energijos, kad galėtų per-

šokti iš vieno sluoksnio į kitą. Skysčiui auštant, jo molekulių kinetinė energija mažėja ir molekulės išlieka pusiausvyros padėtyje. Esant lydymosi (kietėjimo) temperatūrai, visos skysčio molekulės yra pusiausvyros padėtyje ir išsidėsčiusios tvarkingai. Skysčiui kietėjant, netvarkingas molekulių išsidėstymas staiga virsta tvarkingu.

Kietėdamas skystis išskiria į aplinką šilumą, lygią šilumos kiekiui, kuris sunaudojamas tam kūnui išlydyti. Kietėjant išsiskiriantis šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal tą pačią (11.8) formulę, tik šiuo atveju jis yra neigiamas:

$$Q = -\lambda m. \qquad (11.9)$$

Kadangi kietėjant išsiskiria tiek pat šilumos, kiek jos sunaudojama kūnui išlydyti, tai savitoji lydymosi šiluma λ dar vadinama savitąja kietėjimo šiluma. Lydymasis ir kietėjimas schemiškai pavaizduotas 11.2.4 paveiksle.



11.2.4 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Paaiškinkite garavimą ir kondensaciją. Pateikite jų pavyzdžių.

2. Nuo ko priklauso garavimo sparta? Atsakymą papildykite pavyzdžiais.

3. Kas yra savitoji garavimo šiluma? Kokia jos fizikinė prasmė?

4. Palyginkite 1 kg vandens ir 1 kg vandens garų vidinę energiją, esant 100 °C temperatūrai.

5. Paaiškinkite lydymąsi ir kietėjimą. Pateikite jų pavyzdžių.

6. Kodėl medžiaga lydosi ir kietėja, esant tam tikrai temperatūrai?

7. Sidabro garai kondensuojasi, kai temperatūra pasiekia 2466 K. Kiek šilumos išsiskiria kondensuojantis 0,5 kg sidabro? Sidabro savitoji šiluma lygi 2,34 MJ/kg. (1,17 MJ)

8. Žmogaus organizmo šiluminė galia lygi 75 W. Pastovi jo kūno temperatūra palaikoma garinant vandenį nuo odos paviršiaus. Kiek vandens nuo odos paviršiaus išgaruoja per 1 h? (0,12 kg)

9. Kiek šilumos į aplinką išskiria kietėdamas 200 kg masės švino gabalas, kurio temperatūra 600 K? (5 MJ)

Mokomės spręsti uždavinius

Apskaičiuokime, kiek šilumos reikia, norint 5 kg vario, kurio temperatūra 286 K, sušildyti iki lydymosi temperatūros ir išlydyti. Atmosferos slėgis normalus.

Q – ?	$m = 5$ kg $T_1 = 286$ K $T_2 = 1356$ K $c = 380$ J/(kg · K) $\lambda = 1{,}8 \cdot 10^5$ J/kg

Sprendimas

Šilumos kiekį, reikalingą variui sušildyti iki jo lydymosi temperatūros, rasime taip:

$$Q_1 = cm(T_2 - T_1).$$

Variui išlydyti reikia šilumos kiekio

$$Q_2 = \lambda m.$$

Ieškomas šilumos kiekis lygus šilumos kiekių Q_1 ir Q_2 sumai:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

$$Q = cm(T_2 - T_1) + \lambda m.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$Q = 380\ \text{J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 5\ \text{kg} \cdot (1356 - 286)\ \text{K} + 1{,}8 \cdot 10^5\ \text{J/kg} \cdot 5\ \text{kg} = 20{,}33 \cdot 10^5\ \text{J} + 9 \cdot 10^5\ \text{J} = 2{,}9\ \text{MJ}.$$

Atsakymas: 2,9 MJ.

Užduotys savarankiškam darbui

1. Į 200 kg šalto vandens, kurio temperatūra 283 K, įpilta karšto vandens. Pradinė jo temperatūra buvo 373 K. Sumaišius karštą vandenį su šaltu, nusistovėjo 310 K temperatūra. Kiek karšto vandens buvo įpilta? (85,7 kg)

2. Šaltą žiemos dieną vaikas iš lauko į kambarį atsinešė 0,5 kg masės ledo gabalą. Pradinė jo temperatūra buvo –10 °C. Kiek šilumos reikėjo šiam ledui išlydyti? ($1{,}76 \cdot 10^5$ J)

3. Auštant 40 kg skysto alavo, išsiskyrė 4,62 MJ šilumos. Pradinė alavo temperatūra buvo 505 K. Kokia galiausiai nusistovėjo alavo temperatūra? (259 K)

4. Skysto aliuminio masė 50 kg, o temperatūra 932 K, sukietėjusio aliuminio temperatūra 282 K. Apskaičiuokite, kiek skysto aliuminio vidinė energija didesnė negu kieto. (47,6 MJ)

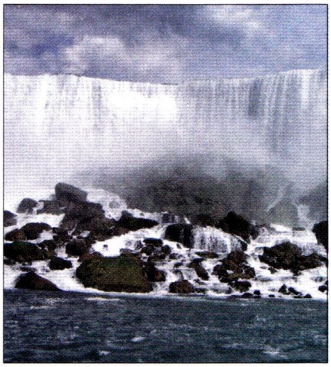
5. Kiek šilumos reikia 1 kg vandens išgarinti? Pradinė vandens temperatūra 0 °C. (2,72 MJ)

6. Kiek šilumos išsiskirs susikondensavus 100 g vandens garų, kurių temperatūra 100 °C, ir susidariusiam vandeniui ataušus iki 40 °C? ($2{,}55 \cdot 10^5$ J)

7. Niagāros krioklys (11.2.5 pav.) – vienas aukščiausių pasaulyje. Jo aukštis yra 48 m. Apskaičiuokite, kiek pakyla nuo šio krioklio krintančio vandens temperatūra, jei visa vandens energija virsta šiluma. (0,11 °C)

8. Lekiančios švininės kulkos temperatūra 373 K. Kai kulka atsitrenkia į sieną, visa jos kinetinė energija virsta šilumine energija. Kokiu greičiu turi lėkti kulka, kad, susidūrusi su siena, išsilydytų? (329 m/s)

11.2.5 pav.



11.3. Darbas termodinamikoje

Darbo termodinamikoje samprata

Pagrindinės sąvokos

Dárbas termodinãmikoje.

Kaip žinote, darbą galima apskaičiuoti dvejaip: kaip kūną veikiančios jėgos, poslinkio ir kampo tarp jų kosinuso sandaugą arba kaip mechaninės kūno energijos pokytį.

Mechanikoje darbą atlieka sunkio, tamprumo, trinties jėgos, termodinamikoje – dujų slėgimo jėga. Dujos dirba vidaus degimo varikliuose, pneumatiniuose prietaisuose ir įrenginiuose, transporteriuose. Suspaustas oras varsto autobusų ir troleibusų duris, veikia automobilių stabdžius. Dujoms atliekant darbą, pats įrenginys (vidaus degimo variklis, pneumatinis plaktukas ir pan.) nejuda, tik jo dalys pasislenka viena kitos atžvilgiu.

Termodinamikoje, panašiai kaip ir mechanikoje, darbą galima išreikšti energijos pokyčiu. Tačiau šiuo atveju jis lygus ne kinetinės, o vidinės energijos pokyčiui.

Darbo termodinamikoje apskaičiavimas

Mokydamiesi mechanikos, nagrinėjote daugybę pavyzdžių, iliustruojančių, kaip mechaninė energija virsta vidine. Tačiau galimas ir atvirkščias vyksmas – vidinės energijos virsmas mechaniniu darbu. Toks procesas vyksta šiluminėse mašinose. Vienas svarbiausių termodinaminių procesų, vykstančių jose, yra dujų plėtimasis. Dujoms plečiantis, slėgimo jėga $\vec{F}'$ atlieka darbą, įveikdama išorines slėgimo jėgas. Jį apskaičiuoti nesunku.

Tarkime, kad besiplečiančių dujų tūris pakinta nuo V_1 iki V_2, o stūmoklis cilindre pasislenka atstumu Δh (11.3.1 pav.), be to, dujų slėgimo į stūmoklį jėga $\vec{F}'$ yra pastovi. Tada dujų atliekamą darbą išreiškiame taip:

$$A' = F'\Delta h = pS\Delta h = p(V_2 - V_1); \qquad (11.10)$$

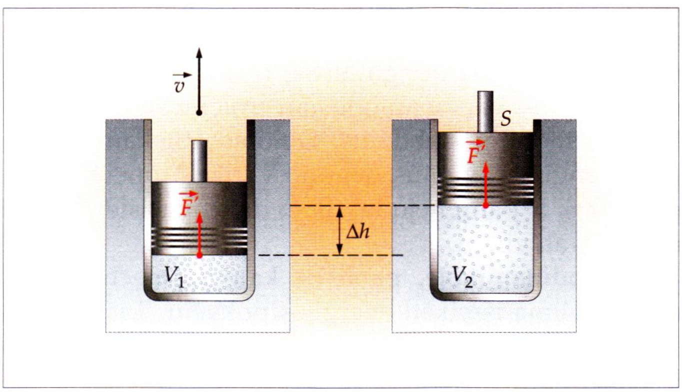
čia p – dujų slėgis, V_1 – pradinis dujų tūris, V_2 – galinis tūris. Šį darbą galime užrašyti kaip dujų slėgio ir tūrio pokyčio sandaugą:

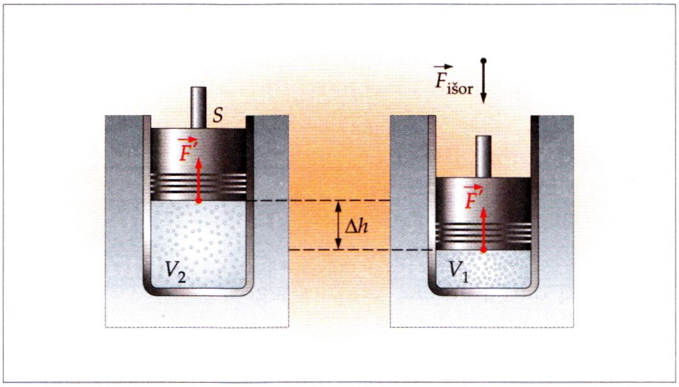
$$A' = p\Delta V. \qquad (11.11)$$

Iš (11.11) lygties matyti, kad ***dárbas termodinãmikoje*** išreiškiamas dujų slėgio ir tūrio pokyčio sandauga. Darbą dujos atlieka tik tada, kai kinta jų tūris. Plėsdamosi dujos atlieka teigiamą darbą, nes slėgimo jėgos ir stūmoklio poslinkio kryptys sutampa. Kai dujos plečiasi, su stūmokliu susiduriančių molekulių greitis mažėja, o drauge mažėja ir vidinė dujų energija. Vadinasi, plėsdamosi dujos aušta.

Slegiamų dujų darbas (11.3.2 pav.) apskaičiuojamas pagal tą pačią (11.11) formulę, kaip ir besiplečiančių

11.3.1 pav.





11.3.2 pav.

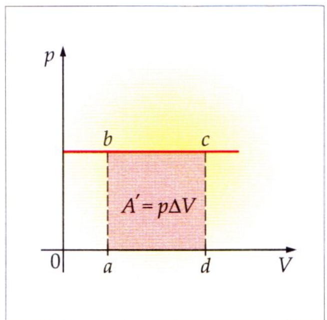
dujų darbas. Tačiau reikia atsižvelgti į tai, kad slegiamos dujos atlieka neigiamą darbą ($A' < 0$, nes $\Delta V < 0$). Slegiamų dujų vidinė energija didėja, dėl to kyla jų temperatūra.

Išorinių jėgų atliekamas darbas A skiriasi nuo dujų darbo A' tik ženklu:

$$A = -A' = -p\Delta V. \tag{11.12}$$

Dujoms plečiantis, išorinės jėgos atlieka neigiamą darbą ($A = -A' < 0$). Slegiamas dujas veikiančios išorinės jėgos vektoriaus kryptis sutampa su poslinkio kryptimi, todėl išorinių jėgų darbas yra teigiamas ($A > 0$).

Geometrinis darbo termodinamikoje aiškinimas



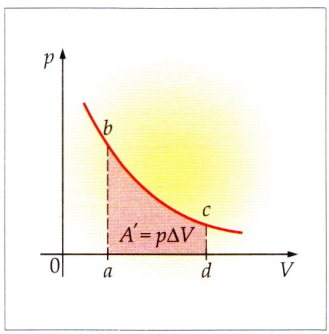
11.3.3 pav.

Geometriškai paprasčiausia aiškinti darbą, kurį atlieka dujos, kai jų būsena kinta izobariškai, t. y. kai slėgis pastovus (p = const). Tokio vyksmo grafikas p ir V koordinačių sistemoje pavaizduotas 11.3.3 paveiksle. Matome, kad stačiakampio *abcd* plotas lygus dujų atliekamo darbo ($A' = p\Delta V$) skaitinei vertei.

Keičiantis dujų būsenai, tūris gali būti pastovus (V = const; izochorinis vyksmas). Tada dujos darbo neatlieka, nes jų tūrio pokytis lygus nuliui: $\Delta V = 0$.

Dujų būsena gali pasikeisti ir nekintant temperatūrai (T = const; izoterminis vyksmas). Tokio vyksmo grafikas pavaizduotas 11.3.4 paveiksle. Šiuo atveju dujų atliekamo darbo skaitinė vertė lygi figūros, apribotos grafiko, ašies OV ir atkarpų *ab* bei *cd*, plotui.

11.3.4 pav.



Klausimai ir užduotys ??

1. Kuo ypatingas darbas termodinamikoje? Pateikite jo pavyzdžių.

2. Kokį darbą atlieka:
a) plėsdamosi dujos;
b) slegiamos dujos?
Atsakymą pagrįskite.

3. Kokį darbą atlieka išorinės jėgos:
a) dujoms plečiantis;
b) dujas spaudžiant?
Atsakymą pagrįskite.

4. Kaip geometriškai aiškinamas dujų atliekamas darbas?

5. Iš akvariumo dugno į viršų kyla oro burbuliukas. Ar jame esančios dujos atlieka darbą? Atsakymą pagrįskite.

6. Kaitinamų dujų tūris padidėjo 800 cm^3, o slėgis buvo pastovus ir lygus 10^5 Pa. Apskaičiuokite dujų atliktą darbą. (80 J)

7. 1 kg anglies dioksido (CO_2) dujų temperatūra pakilo nuo 268 K iki 400 K, o slėgis liko pastovus. Kokį darbą atliko plėsdamosi dujos? (24,93 kJ)

8. Izobariškai kaitinamos deguonies (O_2) dujos atliko 25 kJ darbą. Jų temperatūra padidėjo 200 K. Apskaičiuokite deguonies dujų masę. (0,48 kg)

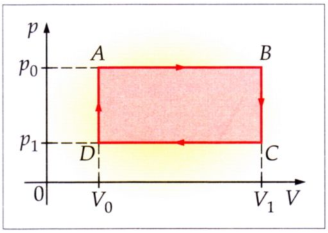
9. Apskaičiuokite darbą, kurį atlieka 1 mol idealiųjų dujų, izobariškai kaitinamų 1 K. (8,31 J)

10. Pradinis dujų tūris lygus 1,1 atm[1]. Izotermiškai slegiamų dujų tūris sumažėjo nuo 5 m^3 iki 0,5 m^3.
a) Nubraižykite šio vyksmo grafiko eskizą p ir V koordinačių sistemoje.
b) Grafiškai pavaizduokite, kokį darbą atlieka išorinės jėgos, suspausdamos dujas.

11. Guminiame balione esančių dujų temperatūra pakilo 50 °C ir dėl to dujos atliko 240 J darbą. Apskaičiuokite šių dujų masę, kai yra žinoma, kad jų molio masė lygi 0,069 kg/mol. (0,039 kg)

12. Cilindre normaliomis sąlygomis buvo 116 g oro. Iš pradžių jis buvo izobariškai pakaitintas iki 200 °C, paskui izochoriškai ataušintas iki 50 °C, tada izobariškai suslėgtas iki pradinio tūrio ir izochoriškai grąžintas į pradinę būseną (11.3.5 pav.).
a) Apskaičiuokite darbą, kurį oras atliko ciklo metu.
b) Nubraižykite ciklą sudarančių vyksmų grafikus p ir V bei p ir T koordinačių sistemose.

11.3.5 pav.



[1] Primename, kad 1 atm = = 101 325 Pa.

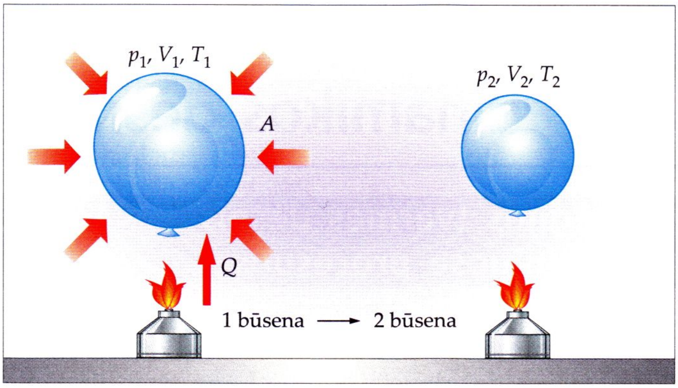
11.4. Pirmasis termodinamikos dėsnis

Energijos tvermės dėsnis šiluminiuose procesuose

Išnagrinėjome du vidinės energijos kitimo būdus: darbą ir šilumos perdavimą. Apie juos kalbėjome atskirai, tačiau dažniausiai vidinė kūnų energija kinta tuo pat metu atliekant darbą ir perduodant šilumą. Kiekybinį kūno vidinės energijos pokyčio ΔU, šilumos kiekio Q ir išorinių jėgų atliekamo darbo A ryšį apibūdina pirmasis termodinamikos dėsnis, gaunamas iš pagrindinio gamtos dėsnio – energijos tvermės dėsnio. Energijos tvermės dėsnis teigia, kad ***energija gamtoje niekur neišnyksta ir nesukuriama, jos kiekis nekinta, tik vienos rūšies energija virsta kitos rūšies energija.*** Šis dėsnis galioja visiems gamtos reiškiniams. Mechaniniams reiškiniams jį taikyti jau mokate. Dabar jį pritaikysime šiluminiams reiškiniams. Energijos tvermės dėsnis, apimantis šiluminius reiškinius, vadinamas ***pirmúoju termodinãmikos désniu***. Kadangi termodinamikoje nagrinėjami kūnai (termodinaminės sistemos) nekeičia savo padėties erdvėje, tai jų mechaninė energija nekinta. Kisti gali tik vidinė energija. Aptarsime du vidinės energijos kitimo būdus: kai darbą atlieka išorinės jėgos ir kai pati sistema.

Pirmasis termodinamikos dėsnis, kai darbą atlieka išorinės jėgos

Termodinaminei sistemai, t. y. balione esančioms dujoms (11.4.1 pav.), pritaikykime energijos tvermės dėsnį. Iš šildytuvo gavusios šilumos kiekį Q, dujos šyla, vidinė jų energija didėja. Be to, dujos balione dar yra spaudžiamos – išorinės jėgos atlieka darbą A. Dėl išorinių jėgų darbo vidinė dujų energija taip pat didėja. Vadinasi, keičiantis dujų būsenai, vidinė jų energija didėja tiek dėl šilumos perdavimo, tiek dėl išorinių jėgų atliekamo darbo. Remdamiesi šiuo pavyzdžiu, galime suformuluoti pirmąjį termodinamikos dėsnį bet kuriai termodinaminei sistemai.



11.4.1 pav.

Termodinaminės sistemos vidinės energijos pokytis, atsiradęs keičiantis sistemos būsenai, lygus išorinių jėgų atliekamo darbo ir sistemai suteikto šilumos kiekio sumai:

$$\Delta U = Q + A. \tag{11.13}$$

Iš (11.13) lygties išplaukia, kad uždarosios sistemos vidinė energija nekinta. Jei sistema yra uždara, šilumos apykaita su aplinka nevyksta ($Q = 0$), o išorinių jėgų atliktas darbas lygus nuliui ($A = 0$). Tada

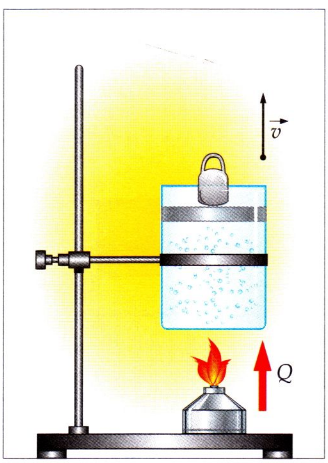
$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0,$$

arba

$$U_2 = U_1.$$

Pirmasis termodinamikos dėsnis, kai darbą atlieka dujos

11.4.2 pav.



Praktiškai svarbus kitas procesas – vidinės energijos virsmas darbu, kurį plėsdamosi atlieka pačios dujos. Žinome, kad išorinių jėgų ir dujų atliekamas darbas skiriasi tik ženklu ($A' = -A$), todėl, atsižvelgdami į tai, pirmąjį termodinamikos dėsnį (11.13) galime užrašyti taip:

$$Q = \Delta U + A'. \tag{11.14}$$

Vadinasi, ***termodinaminei sistemai perduotas šilumos kiekis naudojamas jos vidinei energijai pakeisti ir sistemos darbui atlikti įveikiant išorines jėgas.***

Konkrečiu pavyzdžiu pagrįskime šią pirmojo termodinamikos dėsnio formuluotę. Sakykime, dujos cilindre šildomos (11.4.2 pav.). Šildytuvo suteiktas ši-

lumos kiekis Q naudojamas dujų vidinei energijai ΔU padidinti ir darbui A' atlikti. Jei sistema negauna šilumos iš aplinkos ($Q = 0$), tai iš (11.14) formulės išplaukia, kad sistema atlieka darbą eikvodama savo vidinę energiją:

$$A' = -\Delta U. \qquad (11.15)$$

Neturėdama vidinės energijos atsargų, sistema negalės atlikti darbo. Ši išvada labai svarbi paneigiant amžinojo variklio idėją. Vadinasi, negalima sukurti tokio variklio, kuris galėtų dirbti nesustodamas. Išeikvojęs visas vidinės energijos atsargas, variklis nustoja dirbęs. Pirmąjį termodinamikos dėsnį pritaikėme šilumos požiūriu izoliuotai sistemai ($Q = 0$). Išvengti šilumos apykaitos su aplinka padeda gera dujų šiluminė izoliacija.

Pirmasis termodinamikos dėsnis paaiškina dyzelinių vidaus degimo variklių[1] veikimą. Tokiuose varikliuose dujos suspaudžiamos staiga, todėl šilumos apykaita su aplinka nespėja įvykti. Pagal pirmąjį termodinamikos dėsnį dujų vidinės energijos pokytis ΔU lygus išorinių jėgų atliekamam darbui:

$$\Delta U = A. \qquad (11.16)$$

Kadangi išorinės jėgos, slėgdamos dujas, atlieka teigiamą darbą, tai staiga suspaudžiamų dujų vidinė energija didėja, jų temperatūra kyla ir pasiekia 500–700 °C. Suspaudimo pabaigoje į cilindrą įpurškiami degalai, kurie dėl aukštos temperatūros užsidega. Dujoms degant, slėgis labai padidėja ir plėsdamosi jos stumia stūmoklį priešinga kryptimi. Dyzeliniai varikliai plačiai paplitę, nes naudoja pigesnius degalus. Tačiau šių variklių degalų tiekimo sistemai reikalingos labai tiksliai pagamintos detalės, o jų gamyba brangi.

Šilumos balanso lygtis

Aptarkime šilumos apykaitą izoliuotoje aplinkos atžvilgiu sistemoje. Sakykime, į kalorimetrą su kambario temperatūros vandeniu įmetamas įkaitintas geležies gabalėlis. Tarp jo ir vandens vyksta šilumos apykaita. Šie kūnai yra izoliuoti nuo kitų kūnų, todėl darbas sistemoje neatliekamas. Pagal energijos tvermės dėsnį abiejų kūnų vidinės energijos pokyčių

[1] Primename, kad dyzelinis variklis ir jame naudojami degalai taip pavadinti pagerbiant vokiečių išradėją Rudolfą Dyzelį (*Rudolf Diesel*, 1858–1913).

algebrinė suma lygi nuliui: $\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$. Kadangi vidinė kūnų energija pakinta tik dėl šilumos perdavimo, tai, remdamiesi pirmuoju termodinamikos dėsniu, gauname:

$$Q_1 + Q_2 = 0.$$

Ši lygtis vadinama ***šilumõs balánso lygtimì***. Joje Q_1 ir Q_2 – kūnų gautas ir atiduotas šilumos kiekis. Gautas šilumos kiekis yra teigiamas ($Q > 0$), atiduotas – neigiamas ($Q < 0$).

Jei šilumos apykaita vyksta tarp daugiau negu dviejų kūnų, izoliuotų nuo aplinkos, šilumos balanso lygtis užrašoma taip:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + ... = 0. \qquad (11.17)$$

Klausimai ir užduotys

1. Suformuluokite pirmąjį termodinamikos dėsnį, kai darbą atlieka išorinės jėgos.

2. Suformuluokite pirmąjį termodinamikos dėsnį, kai darbą atlieka pačios dujos.

3. 11.4.3 paveiksle pavaizduotas vienas iš amžinojo variklio modelių. Įrodykite, kad toks variklis negali veikti amžinai.

4. Gavusios 130 kJ šilumos, dujos atliko 60 kJ darbą. Kokia buvo dujų galinė vidinė energija? Dujų vidinė energija iki šildymo pradžios 230 kJ. (300 kJ)

5. Uždarame inde yra 64 g deguonies dujų, kurių slėgis 0,1 MPa, o temperatūra 27 °C. Pakaitintų dujų slėgis padidėjo 3 kartus.

a) Apskaičiuokite indo tūrį. ($4{,}9 \cdot 10^{-2}$ m^3)

b) Raskite galinę dujų temperatūrą. (900 K)

c) Apskaičiuokite, kiek šilumos gavo dujos (skaičiuodami dviatomių dujų vidinės energijos pokytį, koeficientą imkite lygų $\frac{5}{2}$). (24,9 kJ)

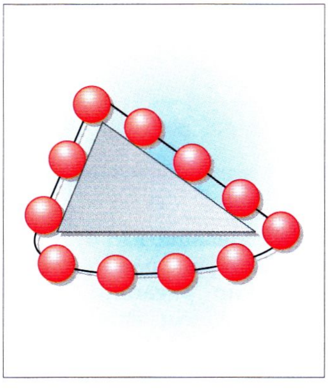
6. 200 g oro buvo pakaitinta 30 K. Jo slėgis nekito.

a) Apskaičiuokite dujų atliktą darbą. (2,49 kJ)

b) Apskaičiuokite orui suteiktą šilumos kiekį. (8,70 kJ)

c) Nustatykite, kiek pakito vidinė dujų energija. (6,21 kJ)

11.4.3 pav.



11.5. Antrasis termodinamikos dėsnis

Negrįžtamieji vyksmai

Pirmasis termodinamikos dėsnis yra energijos tvermės dėsnis, pritaikytas šiluminiams reiškiniams. Tačiau jis nenurodo gamtoje vykstančių šiluminių reiškinių krypties. Labai dažnai procesai, neprieštaraujantys šiam dėsniui, gamtoje nevyksta. Pateikiame tokio proceso pavyzdį. Į kalorimetrą su šaltu vandeniu panardinamas karštas kūnas. Šaltas vanduo, atiduodamas tam tikrą šilumos kiekį karštam kūnui, dar labiau vėsta, o karštas kūnas, patekęs į šaltą vandenį, kaista smarkiau. Pirmasis termodinamikos dėsnis šiuo atveju galioja, energijos tvermės dėsnis nepažeidžiamas, tačiau tokie procesai iš tikrųjų niekada nevyksta. Šiluma gamtoje perduodama tik viena kryptimi – karštesni kūnai ją *savaime* perduoda šaltesniems. Tai tęsiasi tol, kol kūnų temperatūra susilygina – nusistovi šiluminė pusiausvyra. Atvirkščias procesas, t. y. savaiminis šaltesnio kūno šilumos perdavimas karštesniam, gamtoje nevyksta. Šalto kūno šilumą būtų galima atiduoti karštesniam, tačiau reikėtų naudoti specialius įrenginius: šaldytuvus, šilumos siurblius.

Pagrindinės sąvokos

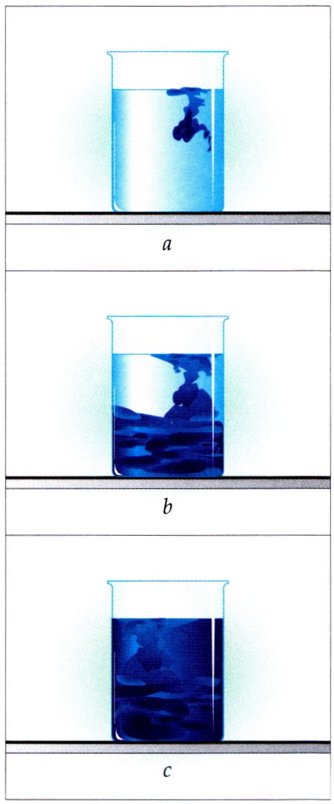
Negrįžtamàsis vỹksmas.

Kitas pavyzdys. Suspaustos dujos cilindre plečiasi tol, kol jų slėgis susilygina su išoriniu atmosferos slėgiu. Tačiau niekada *savaime* dujos pačios vėl nesusispaudžia. Suspausti jas galima tik paveikus išorine jėga.

Procesai, kurie savaime vyksta tik viena kryptimi, vadinami negrįžtamaĩsiais vyksmaĩs.

Difuzija taip pat yra negrįžtamasis vyksmas. Į vandenį įpylus rašalo, jo molekulės susimaišo su vandens molekulėmis (11.5.1 pav.) ir visas vanduo ilgainiui nusidažo mėlynai, tačiau rašalo molekulės negali savaime grįžti į vandens paviršių.

11.5.1 pav.



Gamtoje visi makroskopiniai procesai vyksta tik viena kryptimi. Priešinga kryptimi jie savaime vykti

11.5.2 pav.

negali. Pavyzdžiui, 11.5.2 paveiksle pavaizduotas grįžtamasis buitinis reiškinys (*b* atvejis) iš tiesų yra neįmanomas.

Viena gamtoje vykstančių procesų kryptis mums yra įprasta. Pavyzdžiui, įmetę akmenį į vandenį, žinome, kad savaime jis nepakils iš vandens ir nesugrįš į mūsų rankas. Šis neįmanomas procesas nesikerta su energijos tvermės dėsniu, tačiau prieštarauja antrajam termodinamikos dėsniui.

Antrasis termodinamikos dėsnis

Antràsis termodinãmikos dėsnis nurodo energijos virsmų gamtoje kryptį ir pabrėžia, kad visi vyksmai yra negrįžtamieji. Šio dėsnio negalima išvesti teoriškai. Kaip ir pirmasis termodinamikos dėsnis, jis pagrįstas daugelio bandymų rezultatais. Fizikinę jo prasmę sudaro tai, kad medžiagos molekulių šiluminio judėjimo energija kokybiškai skiriasi nuo kitų rūšių energijos. Kiekvienas vyksmas, kurio metu bet kurios rūšies energija virsta molekulių šiluminio judėjimo energija, yra negrįžtamasis. Antrasis termodinamikos dėsnis formuluojamas įvairiai, tačiau visos formuluotės reiškia tą patį, todėl yra lygiavertės. Labiausiai paplitusi vokiečių mokslininko Rudolfo Klauzijaus (*Rudolf Clausius*) pateikta formuluotė: ***šaltesnė sistema negali perduoti šilumos karštesnei, kai tuo pat metu nekinta abi sistemos arba aplinkos kūnai.***

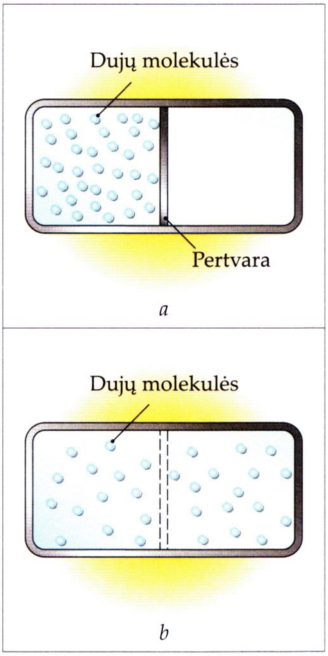
Kita šio dėsnio formuluotė rodo, kad darbu galima paversti ne visą vidinę kūno energiją, o tik jos dalį: ***neįmanoma vidinės energijos perduoti iš aukštos temperatūros šaltinio taip, kad atliktas darbas būtų lygiavertis tam vidinės energijos kiekiui.*** Ši formuluotė turi svarbią pramoninę reikšmę. Ji rodo, kad neįmanoma jėgainėse deginamų anglių, naftos ar dujų visos vidinės energijos paversti darbu. Dalis energijos visada perduodama aplinkai: vandeniui aušinimo sistemoje, atmosferai.

Statistinis antrojo termodinamikos dėsnio aiškinimas

Antrasis termodinamikos dėsnis nurodo, kuria kryptimi kinta uždarosios sistemos kūnų, susidedančių iš daugelio dalelių, makrobūsena. Sakykime, turime sandarų indą, pertvara padalytą į dvi dalis. Kairiojoje da-

lyje yra dujų, o dešiniojoje – tuščia (11.5.3 pav., *a*). Išėmus pertvarą, dujos savaime pasklinda po visą indą (11.5.3 pav., *b*). Judėdamos dujų molekulės vidutiniškai pusę laiko būna vienoje indo dalyje, pusę – kitoje. Tikimybė, kad visos molekulės grįš į kairiąją indo dalį, yra labai maža. Statistiniai skaičiavimai rodo: kad visos molekulės kairiojoje indo pusėje išbūtų 1 μs, reikia laukti daugiau nei $3 \cdot 10^{52}$ metų. Šis laiko tarpas daugelį milijardų kartų ilgesnis už Visatos amžių.

Uždaroji sistema, sudaryta iš daugelio dalelių, savaime pereina iš tvarkingesnės būsenos į ne tokią tvarkingą. Kitaip tariant, uždaroji sistema savaime pereina iš mažiau tikėtinos jos dalelių išsidėstymo būsenos į labiau tikėtiną.



11.5.3 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Kokius vyksmus vadiname negrįžtamaisiais? Pateikite jų pavyzdžių.

2. Kokia yra antrojo termodinamikos dėsnio esmė? Suformuluokite antrąjį termodinamikos dėsnį.

3. Kaip statistiškai aiškinamas antrasis termodinamikos dėsnis?

4. Kodėl dūmai išsisklaido ore? Kodėl šis vyksmas yra negrįžtamasis?

11.6. Šiluminiai varikliai. Jų naudingumo koeficientas

Šiluminių variklių samprata ir naudojimas

Pagrindinės sąvokos

Šilum̃inis var̃iklis, naudingùmo koeficiei̇̃tas.

Energijos, tenkančios vienam gyventojui, gamyba ir suvartojimas yra vienas svarbiausių šalies rodiklių. Vienas Žemės gyventojas per parą suvartoja vidutiniškai 180 mln. džaulių energijos. Ji naudojama įvairiose srityse: pramonėje, transporte, žemės ūkyje, buityje ir kt. Dar XIX a. buvo pradėti gaminti įrenginiai, galintys panaudoti vidinę energiją. Tai – šiluminiai varikliai.

Šilumìniais varìkliais vadinami įrenginiai, kurie vidinę kuro energiją paverčia mechanine energija.

Šiluminiai varikliai įrengiami automobiliuose, motocikluose, šiluminėse bei atominėse elektrinėse, laivuose. Jie naudojami ir aviacijoje. Lengvuose lėktuvuose įrengiami stūmokliniai varikliai, dideliuose laineriuose – reaktyvieji varikliai, kurie taip pat yra šiluminiai varikliai. Reaktyvųjį judėjimą jau nagrinėjote šiais mokslo metais. Dabar aptarsime bendruosius šiluminių variklių veikimo principus.

Šiluminio variklio sandara ir bendrieji veikimo principai

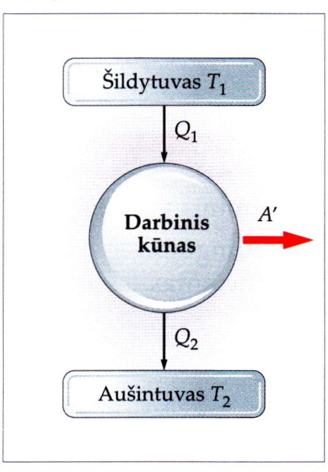
Kiekvieną šiluminį variklį sudaro trys pagrindinės dalys (11.6.1 pav.):

- šildytuvas, teikiantis energiją darbiniam kūnui;
- darbinis kūnas (dujos arba garai);
- aušintuvas, paimantis dalį darbinio kūno energijos.

Šildytuvu vadinamas garo katilas arba degimo kamera. Šildytuve degant kurui arba vykstant branduolinėms reakcijoms, išsiskiria šiluma, kuri tiekiama darbiniam kūnui. Kuras – tai degiosios medžiagos: dujos, nafta, anglys. Apie 90 % visos žmonijos per metus suvartojamos energijos gaunama deginant kurą. Jo kokybę apibūdina savitoji degimo šiluma q, t. y. šilumos kiekis, kurį išskiria visiškai sudegdamas 1 kg kuro (iš pagrindinės mokyklos fizikos kurso prisiminkime, kad $[q]$ = 1 J/kg). Žinodami savitąją kuro degimo šilumą, galime apskaičiuoti, kiek šilumos išsiskirs sudegus bet kuriam jo kiekiui m:

$$Q = qm. \qquad (11.18)$$

11.6.1 pav.



Iš šildytuvo gauta energija padidina darbinio kūno temperatūrą šimtais ar net tūkstančiais laipsnių. Dėl to darbinio kūno slėgis pasidaro didesnis už aplinkos slėgį ir kūnas ima plėstis. Plėsdamasis jis atlieka darbą.

Vidaus degimo variklyje plėsdamosi dujos stumia stūmoklį, o šis slinkdamas suka alkūninį veleną. Jo sukimasis krumpliaračių pavaros sistema perduodamas automobilio ratams. Taip degant kurui išsiskyrusi energija virsta įkaitusių dujų vidine energija, o ši – automobilio slenkamojo judėjimo mechanine energija.

Kad variklis dirbtų ilgai, procesai jame turi periodiškai kartotis. Dujoms išsiplėtus, variklio stūmoklį reikia grąžinti į pradinę padėtį, taigi dujas suspausti. Žemesnės temperatūros dujas spausti lengviau, todėl prieš spaudžiant dujos atvėsinamos. Tam naudojamas aušintuvas. Garo turbinoje tai yra atmosferos oras arba specialus įrenginys panaudotajam garui aušinti ir kondensuoti (vadinamasis kondensatorius), vidaus degimo variklyje – atmosferos oras. Vidaus degimo variklyje deginiai dažniausiai išleidžiami lauk ir naujas darbo ciklas prasideda su nauja dujų porcija. Tiek vidaus degimo variklių, tiek kitų šiluminių mašinų darbas yra nuolat pasikartojančių ciklų visuma.

Apibendrindami šiluminio variklio darbo principus, galime suformuluoti svarbiausias šio variklio darbo sąlygas. Pirma, šiluminis variklis gali veikti tada, kai skiriasi darbinio kūno ir aplinkos temperatūra. Antra, darbą jis atlieka eikvodamas vidinę energiją, kai šiluma iš karštesnių kūnų perduodama šaltesniems. Dėl to variklio atliekamas darbas yra mažesnis už šildytuvo atiduotą šilumos kiekį.

Šiluminio variklio darbas ir naudingumo koeficientas

Šiluminiame variklyje, pasibaigus vienam darbo ciklui, dujos grąžinamos į pradinę būseną. Vadinasi, jų vidinės energijos pokytis lygus nuliui: $\Delta U = 0$. Tada pagal pirmąjį termodinamikos dėsnį dujų atliktas darbas lygus per ciklą gautam šilumos kiekiui:

$$\Delta U = Q - A' = 0, \text{ arba } A' = Q. \quad (11.19)$$

Šilumos kiekis Q lygus iš šildytuvo gauto šilumos kiekio Q_1 ir aušintuvui atiduoto šilumos kiekio Q_2 skirtumui (žr. 11.6.1 pav.), todėl

$$A' = |Q_1| - |Q_2|. \quad (11.20)$$

Variklio atlikto darbo A' ir iš šildytuvo gauto šilumos kiekio Q_1 santykis vadinamas ***šilumìnio varìklio naudingùmo koeficientù***:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}. \quad (11.21)$$

Pagal (11.21) formulę apskaičiuojamas realaus šiluminio variklio naudingumo koeficientas. Kadangi tam tikras šilumos kiekis atiduodamas aušintuvui,

naudingumo koeficientas visada yra mažesnis už vienetą ($\eta < 1$), arba už 100 % ($\eta < 100$ %). Lentelėje pateikiame kai kurių šiluminių variklių naudingumo koeficientų vertes.

Kai kurių šiluminių variklių naudingumo koeficientas

Šiluminis variklis	Naudingumo koeficientas, %
Karbiuratorinis automobilio variklis	25
Turboreaktyvinis variklis	20–30
Dujų turbinos įrenginys	25–29
Karbiuratorinis aviacinis variklis	35–40
Turbodyzelinis variklis	35–44
Garo turbina	15–40

Kokiomis sąlygomis šiluminiai varikliai dirba efektyviai, bandyta aiškintis dar XIX a. Prancūzų inžinierius Sadi Karno (*Sadi Carnot*) 1824 m. knygoje „Apmąstymai apie varomąją ugnies jėgą" aprašė idealaus šiluminio variklio modelį, pasiūlė jo naudingumo koeficiento skaičiavimo formulę

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \qquad (11.22)$$

Sadi Karno

Jos esmė tokia: ***jokios realios šiluminės mašinos, turinčios T_1 temperatūros šildytuvą ir T_2 temperatūros aušintuvą, naudingumo koeficientas negali būti didesnis už idealios mašinos naudingumo koeficientą.***

Iš (11.22) formulės matyti, kad šiluminių variklių naudingumo koeficientą galima padidinti dviem būdais: didinant šildytuvo temperatūrą T_1 ir mažinant aušintuvo temperatūrą T_2. Jeigu aušintuvo temperatūra T_2 būtų lygi absoliučiajam nuliui, tai mašinos naudingumo koeficientas prilygtų vienetui. Šis naudingumo koeficiento didinimo būdas neįgyvendinamas, nes aušintuvo temperatūra dažniausiai būna lygi atmosferos temperatūrai, t. y. apie 300 K. Vadinasi, reikia didinti šildytuvo temperatūrą T_1, kitaip tariant, sudaryti kuo didesnį šildytuvo ir aušintuvo temperatūrų skirtumą.

Šiluminio variklio naudingumo koeficientą galima padidinti ir kitais būdais: mažinant jo detalių tarpusavio trintį, taip pat nuostolius, patiriamus dėl to, kad kuras sudega ne iki galo.

Klausimai ir užduotys

1. Kokie įrenginiai vadinami šiluminiais varikliais?

2. Kam šiluminiams varikliams reikalingas aušintuvas?

3. Kokie yra bendrieji šiluminių variklių veikimo principai?

4. Ką vadiname šiluminio variklio naudingumo koeficientu? Kokiais būdais jį galima padidinti?

5. Šiluminis variklis per vieną ciklą iš šildytuvo gauna 100 J šilumos, o aušintuvui atiduoda 60 J. Koks yra šio variklio naudingumo koeficientas? (40 %)

6. Nuo Žemės paviršiaus kylančiuose oro srautuose galima įžvelgti šiluminį variklį. Atraskite juose pagrindinius šiluminio variklio struktūrinius elementus. Įvardykite juos.

Mokomės spręsti uždavinius

1. Sudegindama 0,4 kg dyzelinių degalų, garo turbina pagamina 1 kWh energijos. Į turbiną patenkančių garų temperatūra 300 °C, aušintuvo temperatūra 35 °C. Apskaičiuokime:

a) garo turbinos naudingumo koeficientą;

b) idealios šiluminės mašinos, veikiančios tokiomis pat sąlygomis, naudingumo koeficientą.

η_1 – ?	$t_1 = 300$ °C
η_2 – ?	$t_2 = 35$ °C
	$m = 0{,}4$ kg
	$A' = 1$ kWh $= 3{,}6 \cdot 10^6$ J
	$q = 4{,}2 \cdot 10^7$ J/kg

Sprendimas

a) Garo turbinos naudingumo koeficientą apskaičiuojame pagal formulę

$$\eta_1 = \frac{A'}{Q}.$$

Įrašę į ją šilumos kiekio, kuris išsiskiria degant dyzeliniams degalams, išraišką $Q = qm$, gauname:

$$\eta_1 = \frac{A'}{qm}.$$

Apskaičiuojame naudingumo koeficiento vertę:

$$\eta_1 = \frac{3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}}{4{,}2 \cdot 10^7\ \text{J/kg} \cdot 0{,}4\ \text{kg}} = 0{,}21.$$

b) Idealios šiluminės mašinos naudingumo koeficientas randamas pagal formulę

$$\eta_2 = \frac{T_1 - T_2}{T_1};$$

čia T_1 = (273 + 300) K = 573 K, T_2 = (273 + 35) K = = 308 K. Įrašę dydžių vertes, turime:

$$\eta_2 = \frac{573\ \text{K} - 308\ \text{K}}{573\ \text{K}} = 0,46.$$

Palyginę realios ir idealios šiluminės mašinos, veikiančios tokiomis pat sąlygomis, naudingumo koeficientus, matome, kad idealios mašinos jis yra daugiau kaip 2 kartus didesnis.

Atsakymas: a) 0,21; b) 0,46.

2. Reaktyvinio lėktuvo variklis 100 km ilgio kelyje sudegina $2{,}04 \cdot 10^3$ kg benzino. Kai jo galia siekia $4{,}4 \cdot 10^4$ kW, lėktuvas įgyja 900 km/h greitį. Apskaičiuokime:

a) šilumos kiekį, išsiskiriantį degant $2{,}04 \cdot 10^3$ kg benzino;

b) reaktyviojo variklio naudingumo koeficientą.

Q_1 – ?	s = 100 km = 10^5 m
η – ?	$m = 2{,}04 \cdot 10^3$ kg
	$N = 4{,}4 \cdot 10^7$ W
	v = 900 km/h = 250 m/s
	$q = 4{,}6 \cdot 10^7$ J/kg

Sprendimas

a) Šilumos kiekį, kurį išskiria visiškai sudegdamas benzinas, apskaičiuojame pagal formulę

$$Q_1 = qm.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$Q_1 = 4{,}6 \cdot 10^7\ \text{J/kg} \cdot 2{,}04 \cdot 10^3\ \text{kg} \approx 9{,}4 \cdot 10^{10}\ \text{J}.$$

b) Variklio naudingumo koeficientas

$$\eta = \frac{A}{Q_1}. \qquad (1)$$

Naudingąjį variklio darbą išreiškiame variklio galia ir laiku:

$$A = Nt. \qquad (2)$$

Žinodami kelią, galime rasti laiką:

$$t = \frac{s}{v}. \qquad (3)$$

(2) ir (3) įrašome į (1) ir apskaičiuojame naudingumo koeficiento vertę:

$$\eta = \frac{N \cdot s}{Q_1 \cdot v};$$

$$\eta = \frac{4,4 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot 10^5 \text{ m}}{9,4 \cdot 10^{10} \text{ J} \cdot 250 \text{ m/s}} = 0,2.$$

Atsakymas: a) $9,4 \cdot 10^{10}$ J; b) 0,2.

Užduotys savarankiškam darbui

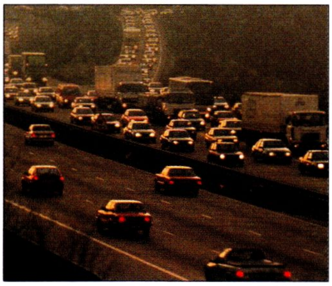
1. Per 1 h automobilio variklis sudegina 5 kg benzino. Dujų temperatūra jo cilindre 1200 K, o išmetamų deginių 370 K. Benzino savitoji degimo šiluma 46 MJ/kg. Apskaičiuokite automobilio variklio galią. (44 kW)

2. Traktoriaus variklio galia 81 kW, naudingumo koeficientas 25 %. Kiek dyzelinių degalų šis traktorius sudegina per 1 h? (27,77 kg)

3. Važiuodamas 27 km/h greičiu, traukinys per 1 h sunaudoja 400 kg dyzelinių degalų. Garvežio variklio naudingumo koeficientas 30 %. Apskaičiuokite garvežio varos jėgą. (186,7 kN)

4. Garo mašinos šildytuvo temperatūra 320 °C, aušintuvo 120 °C. Per vieną ciklą mašina iš šildytuvo gauna 200 kJ šilumos. Apskaičiuokite:
a) garo mašinos naudingumo koeficientą; (62,5 %)
b) darbą, atliekamą per vieną ciklą; (125 kJ)
c) vieno ciklo metu atiduotą šilumos kiekį. (75 kJ)

5. Važiuodama automobiliu į kaimą pas močiutę, Lina pagal spidometro rodmenis nustatė, jog automobilis važiavo 90 km/h vidutiniu greičiu ir sudegino 18 l benzino. Mergaitė žinojo, kad nuo Vìlniaus iki močiutės namų yra 200 km, o automobilio variklio naudingumo koeficientas lygus 35 %. Padėkite Linai atsakyti į šiuos klausimus:
a) kiek šilumos išsiskiria degant 14 l benzino; (580 MJ)
b) kokia yra vidutinė automobilio galia kelionės metu; (25,35 kW)
c) kiek laiko truko Linos kelionė? ($8 \cdot 10^3$ s)



11.7.1 pav.

11.7. Vidaus degimo variklių keliama tarša

Istoriškai apžvelkime automobilių raidą. Prieš 5500 metų (apie 3500 m. pr. Kr. Mesopotãmijoje) atsirado ratas, prieš 400 metų – vėjo varomas automobilis, prieš 230 metų – garo mašinos varomas automobilis. Pagal Karno pasiūlytą idealaus šiluminio variklio teoriją paskutiniaisiais XIX a. dešimtmečiais vokiečių išradėjai sukūrė veikiančius šiluminius vidaus degimo variklius ir jiems pritaikytus dviračiùs, triračiùs bei keturračiùs automobilius. Paskutiniaisiais XIX a. metais Sankt Peterbùrgo inžinierius G. Trinkleris patobulino dyzelinį variklį. Dyzelinui įpurkšti vietoj oro kompresoriaus jis įrengė didelio slėgio kuro siurblį. Tokie slėginio suspaudimo varikliai automobiliuose buvo naudojami visą XX a.

XX a. – neabejotinai automobilių amžius (11.7.1 pav.). Jų gamyba XX a. nuolat spartėjo. Automobilių skaičius smarkiai didėja ir dabar.

Gausėjant automobilių, vis aktualesnės darosi jų keliamos problemos. Pagrindinės iš jų yra šios:

- aplinkos tarša (kenksmingi deginiai, padangų ir kelių dangos nusidėvėjimo dulkės, triukšmas, kuro nutekėjimas, nugaravimas, tepalai, agregatai ir t. t.);
- kraštovaizdžio nuskurdinimas, kultūros paveldo naikinimas (automobiliams reikalingos milžiniškos asfaltu ir betonu padengtos teritorijos, todėl tenka aukoti puikius natūralius gamtovaizdžius bei derlingo dirvožemio plotus, keisti senųjų miestų ir miestelių urbanistinę struktūrą);
- eismo įvykių padariniai (žmonių juose jau žuvo daugiau negu per masines XX a. karų žudynes);
- nesveikas gyvenimo būdas (važinėdami automobiliais, žmonės vis mažiau juda: vaikšto pėsčiomis, važinėja dviračiais).

Plačiau aptarsime vieną šių problemų – automobilių keliamą taršą. Daugiausia teršalų susidaro degant degalams. Jeigu jie sudega ne iki galo ir aplinkoje nepakanka deguonies, susidaro smalkės (CO) – bespalvės ir bekvapės nuodingos dujos:

$$CO_2 + C = 2CO.$$

Mūsų šalyje automobilių tarša dažniausiai vertinama tik pagal išmetamo anglies monoksido kiekį, tačiau negalima pamiršti ir kitų (jų yra apie 60) toksinių komponentų. Neigiamas jų poveikis yra ne tik individualus, bet atskirais atvejais dar ir sumuojasi. Atmosferoje atsiranda naujų junginių – fotooksidantų. Pavyzdžiui, azoto oksidai sudaro rūgštinį lietų, nuo kurio labai kenčia gamtinė aplinka, kultūros paveldo objektai.

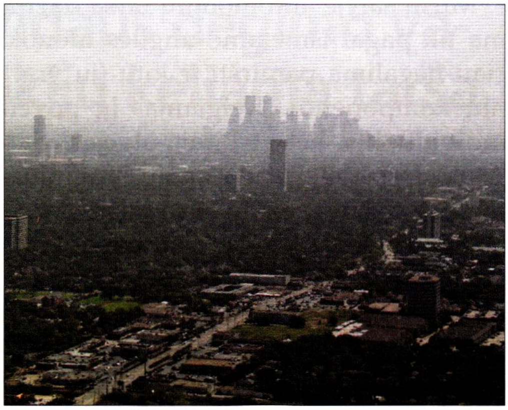
11.7.2 pav.

Automobilio variklyje kartu su 1 kg benzino sudega ir apie 14 kg oro, o į atmosferą išmetama apie 15 kg įvairių dujų mišinio. Vadinasi, vienas automobilis, per metus nuvažiuodamas 10 tūkst. kilometrų ir sudegindamas po 7 kg benzino 100 km, išmeta apie 10 t įvairių toksinių dujų. Jų kiekį bei sudėtį lemia variklio tipas, degalų rūšis, degimo sureguliavimas, važiavimo režimas. Degimo sureguliavimas tikrinamas per techninę automobilio apžiūrą (11.7.2 pav.).

Tyrimai rodo, kad vidutinis šalies automobilis, sudegindamas 1 t degalų, išmeta vidutiniškai 600 kg anglies monoksido, 75 kg angliavandenilių, 30 kg azoto oksidų, 15 kg aldehidų. Vadinasi, kasmet į aplinką patenka apie 400 000 t pavojingų teršalų.

Aktuali vidaus degimo variklių problema – anglies dioksidas (CO_2). Šis junginys sukelia šiltnamio reiškinį. Normaliomis sąlygomis dalį (du trečdalius) iš Saulės atsklidusių infraraudonųjų spindulių (šilumos) sugeria dirvožemis, akmenys, uolienos, o kita dalis (trečdalis) atsispindi ir grįžta į kosmosą. Padidėjusi anglies dioksido koncentracija veikia kaip vienpusis skydas. Saulės spinduliai laisvai patenka į atmosferą, atsispindi nuo įvairių paviršių ir, negalėdami praeiti pro didelės koncentracijos CO_2 sluoksnį, lieka žemuosiuose atmosferos sluoksniuose. Dėl šiltnamio reiškinio kyla oro temperatūra.

Vertinant automobilių išmetamų toksinių medžiagų poveikį gamtai ir žmogaus sveikatai, dažniausiai minimas švino poveikis. Tačiau švinas nėra pavojingiausias. Antai benzpirènas (vienas iš keliolikos automobilio išmetamų policìklinių angliavandenìlių) yra gerokai toksiškesnis. Didžiausias leidžiamasis jo kiekis ore yra viena milijonoji miligramo dalis (švino – 300 kartų didesnė). Pasak vokiečių mokslininkų, benzpirenas sukelia ir skatina piktybines gerklės ir plaučių ligas. Lietuvõs fizikos instituto mokslininkai



11.7.3 pav.

ištyrė, kad benzpireno koncentracija Lietuvojè prie intensyvaus eismo magistralių 15–20 kartų didesnė nei leidžiamóji. Daržovių užterštumas benzpirenu net už 60–70 m nuo Vìlniaus–Kaūno magistralės keliolika kartų didesnis už leidžiamąjį.

Automobilių teršalai sukelia smògą (11.7.3 pav.). Saulėtą dieną oro teršalus veikia ultravioletiniai spinduliai ir susidaro dar toksiškesni junginiai. Šis reiškinys vadinamas fotochèminiu smogù. Labiausiai nuo šių ekologinių problemų nukenčia vaikai ir žmonės, kurie serga kvėpavimo bei širdies ir kraujagyslių sistemos ligomis.

Šiuo metu Europos Sąjungoje (ES) pradėta nauja išmetamųjų dujų valymo era. Diegiamos ir tobulinamos išmetamųjų dujų neutralizavimo sistemos. 1996 m. atsirado dar viena ES direktyva, sugriežtinusi reikalavimus šioje srityje. Atsiradus automobiliuose dujų neutralizavimo sistemoms, aplinkos teršimas kietosiomis dalelėmis sumažėjo nuo 20 g/km iki 2,8 g/km.

Variklių keliamą taršą mažina tinkamai sutvarkyta kelių sistema: aplinkkeliai, viadukai (11.7.4 pav.). Juk neatsitiktinai automobilių tarša tapatinama su viaduko, estakados ar net tuneliuko ties sankryžomis nebuvimu. Siūlomos techninės priemonės (želdynai, ekraninės sienos, ekraniniai namai, pylimai) turėtų mažinti transporto triukšmą ir taršą labiausiai užterštose miesto zonose. Atsižvelgiant į ES reikalavimus, Vìlniuje ir Kaunè turi būti įrengiama daugiau oro kokybės stebėjimo postų.

11.7.4 pav.

Skyriaus „Termodinamika“ apibendrinimas

Vidinė energija

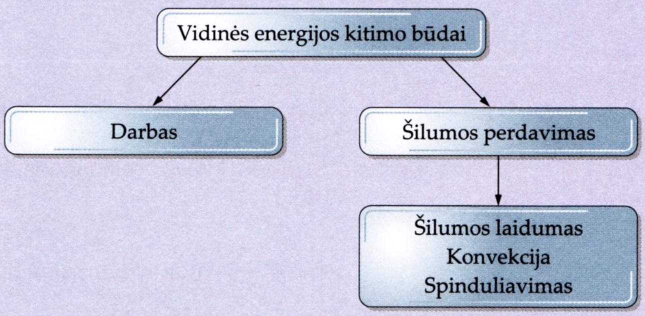
Vidinė kūno energija lygi tą kūną sudarančių dalelių (molekulių arba atomų) netvarkingo judėjimo kūno masės centro atžvilgiu kinetinių energijų ir visų dalelių tarpusavio sąveikos potencinių energijų sumai.

- Idealiųjų vienatomių dujų vidinė energija yra tiesiogiai proporcinga jų absoliučiajai temperatūrai:

$$U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT.$$

- Skysčių ir kietųjų kūnų vidinė energija priklauso ne tik nuo temperatūros, bet ir nuo tūrio: $U = f(T, V)$.

Vidinės energijos kitimas



Šilumos perdavimas

Vieno kūno energijos perdavimas kitam kūnui neatliekant darbo vadinamas šilumos perdavimu, arba šilumos apykaita.

Šilumos kiekis Q

Vidinės energijos dalis, kuri pereina iš vieno kūno į kitą šilumos perdavimo būdu, vadinama šilumos kiekiu:

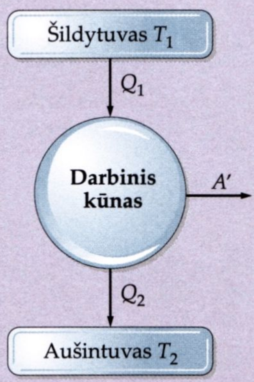
$$Q = cm(t_2 - t_1).$$

Savitoji šiluma c

Savitoji šiluma yra toks šilumos kiekis, kurį reikia suteikti 1 kg medžiagos, kad jos temperatūra pakiltų 1 K.

$$[c] = 1\ \text{J/(kg} \cdot \text{K)}.$$

Garavimas	Garavimas – fazinis virsmas, kurio metu skystis virsta garais jo paviršiuje. Šilumos kiekis, reikalingas skysčiui išgarinti jo virimo temperatūroje, reiškiamas formule $Q = Lm;$ čia L – savitoji garavimo šiluma, m – kūno masė.
Savitoji garavimo šiluma	Šilumos kiekis, reikalingas 1 kg skysčio išgarinti jo virimo temperatūroje, vadinamas savitąja garavimo šiluma. $[L] = 1$ J/kg.
Virimo temperatūra	Temperatūra, kurioje skystis verda, vadinama virimo temperatūra.
Kondensacija	Kondensacija – fazinis virsmas, kurio metu garai virsta skysčiu.
Lydymasis	Lydymasis – fazinis virsmas, kurio metu kietasis kūnas virsta skysčiu. Šilumos kiekis, reikalingas kūnui išlydyti, reiškiamas formule $Q = \lambda m;$ čia λ – savitoji lydymosi šiluma, m – kūno masė.
Savitoji lydymosi šiluma	Savitoji lydymosi šiluma – šilumos kiekis, reikalingas 1 kg kietos medžiagos paversti skysčiu jos lydymosi temperatūroje. $[\lambda] = 1$ J/kg.
Kietėjimas	Kietėjimas – fazinis virsmas, kurio metu skystis virsta kietuoju kūnu.
Šilumos balanso lygtis	Šilumos kiekių uždaroje sistemoje suma lygi nuliui: $Q_1 + Q_2 + Q_3 + ... = 0.$ Gautas šilumos kiekis yra teigiamas ($Q > 0$), atiduotas – neigiamas ($Q < 0$).

Darbas termodinamikoje	Darbas termodinamikoje išreiškiamas dujų slėgio ir tūrio pokyčio sandauga: $A' = p\Delta V; \quad A = -A' = -p\Delta V;$ čia A' – dujų plėtimosi darbas, A – išorinių jėgų darbas.
Pirmasis termodinamikos dėsnis	• Termodinaminės sistemos vidinės energijos pokytis, atsiradęs keičiantis sistemos būsenai, lygus išorinių jėgų atliekamo darbo ir sistemai suteikto šilumos kiekio sumai: $\Delta U = Q + A.$ • Termodinaminei sistemai perduotas šilumos kiekis naudojamas jos vidinei energijai pakeisti ir sistemos darbui atlikti įveikiant išorines jėgas: $Q = \Delta U + A'.$
Antrasis termodinamikos dėsnis	• Šaltesnė sistema negali perduoti šilumos karštesnei, kai tuo pat metu nekinta abi sistemos arba aplinkos kūnai. • Neįmanoma vidinės energijos perduoti iš aukštos temperatūros šaltinio taip, kad atliktas darbas būtų lygiavertis tam vidinės energijos kiekiui.
Šiluminiai varikliai	Šiluminiais varikliais vadinami įrenginiai, kurie vidinę kuro energiją paverčia mechanine energija.
Šiluminio variklio sandara	
Šiluminio variklio naudingumo koeficientas	Šiluminio variklio naudingumo koeficientas lygus variklio atlikto darbo A' ir iš šildytuvo gauto šilumos kiekio Q_1 santykiui: $\eta = \frac{A'}{\lvert Q_1 \rvert} = 1 - \frac{\lvert Q_2 \rvert}{\lvert Q_1 \rvert};$ čia Q_2 – aušintuvui atiduotas šilumos kiekis.

Šiluminiai reiškiniai

12 Garai ir skysčiai

Šiame skyriuje nagrinėsite garus ir skysčius, virimo procesą, aptarsite drėkinimo reiškinius, jų reiškimąsi gamtoje ir taikymą technikoje bei buityje; sužinosite, kas yra sotieji garai, jų slėgis, kritinė temperatūra, oro drėgnis; išsiaiškinsite, kaip veikia oro drėgnio matavimo prietaisai: psichrometras ir higrometras; susipažinsite su dar viena jėga – paviršiaus įtempties jėga.

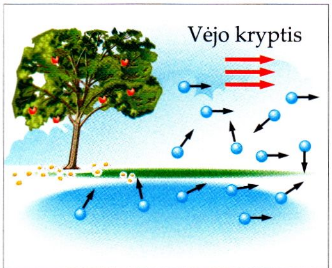
12.1. Sotieji garai ir jų savybės

Pagrindinės sąvokos

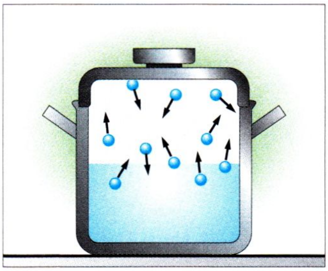
Sotíeji garaĩ,
sočių̃jų garų̃ slė̃gis.

Sotieji garai

Nagrinėdami fazinius virsmus, aptarėme garavimo ir kondensacijos procesus. Žinome, kad, garuojant skysčiui, iš jo paviršiaus išlekia greičiausios molekulės. Jos į skystį gali ir nebesugrįžti, kaip antai iš balos paviršiaus išlėkusios vandens molekulės, pūstelėjus vėjui (12.1.1 pav.). Kambaryje ant radiatoriaus pastatę indelį su trupučiu vandens, po keleto dienų galime rasti jį tuščią. Visas vanduo išgaravo.



12.1.1 pav.


12.1.2 pav.

Kai kurios molekulės, išlėkusios iš skysčio, į jį sugrįžta. (Primename, kad molekulių grįžimą į skystį vadiname kondensacija.) Pavyzdžiui, jei indą su skysčiu sandariai uždengiame, skystis ne tik garuoja, bet ir kondensuojasi (12.1.2 pav.). Abu procesai kompensuoja vienas kitą. Skysčiui garuojant, virš jo esančių garų tankis didėja. Kuo didesnis garų tankis, tuo daugiau molekulių grįžta į skystį. Iš skysčio išlekia vidutiniškai tiek pat molekulių, kiek jų per tą patį laiką grįžta iš garų į skystį. Dėl to skysčio kiekis sandariai uždengtame inde nesikeičia. Sakoma, kad pastovios temperatūros sistemoje „skystis ir garai" nusistovi dinaminė (judrioji) pusiausvyra tarp skysčio ir garų. ***Garai, esantys su skysčiu dinaminėje pusiausvyroje, vadinami sočiaĩsiais garaĩs.***

Sočiųjų garų slėgis

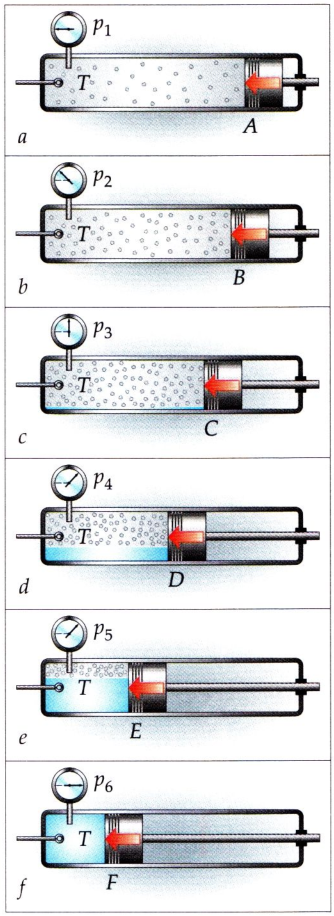
Iš sočiųjų garų apibrėžimo išplaukia, kad, esant tam tikrai temperatūrai, tam tikro tūrio inde negali būti daugiau garų. ***Didžiausias garų, esančių su skysčiu dinaminėje pusiausvyroje, slėgis vadinamas sočių̃jų garų̃ slėgiù (p_0).***

Nesunku įrodyti, kad sočiųjų garų slėgis nepriklauso nuo jų užimamo tūrio, kai temperatūra pastovi. Slegiant sočiuosius garus, jų tankis, o kartu ir molekulių koncentracija (n) iš pradžių šiek tiek padidėja. Dėl to pusiausvyra tarp garavimo ir kondensacijos sutrinka – daugiau molekulių pereina iš garų į skystį

negu iš skysčio į garus. Vadinasi, dalis garų suskystėja, o tam tikros masės skystis užima mažesnį tūrį negu tokios pat masės garai. Nors garų tūris mažėja, jų tankis ir koncentracija išlieka pastovi. Jeigu nekinta temperatūra ir molekulių koncentracija, tai pastovus yra ir dujų slėgis (žr. (10.22) formulę).

Teorinius samprotavimus patvirtina bandymai (12.1.3 pav.). Cilindre esančius vandens garus spaudžiant izotermiškai (T = const, m = const), jų koncentracija, o drauge ir slėgis didėja (12.1.3 pav., *b*). Šiuo atveju garai nėra sotieji. Toliau spaudžiant, ant vidinių indo sienelių pasirodo skysčio lašelių – prasideda kondensacija (12.1.3 pav., *c*). Dar labiau mažinant garų tūrį, tarp garavimo ir kondensacijos nusistovi dinaminė pusiausvyra (12.1.3 pav., *d*). Garai virsta sočiaisiais, o jų slėgis nepriklauso nuo užimamo tūrio. Mažinant sočiųjų garų tūrį, manometro rodmenys nekinta ($p_4 = p_5$; 12.1.3 pav., *e*). Taip yra dėl to, kad sutrinka dinaminė pusiausvyra – kondensacija pasidaro intensyvesnė už garavimą. Vandens cilindre daugėja, o sočiųjų garų koncentracija ir slėgis nekinta. Spaudžiami dar labiau, sotieji vandens garai virsta vandeniu (12.1.3 pav., *f*). Vanduo yra mažai spūdus, todėl, toliau mažinant tūrį, manometro rodmenys staiga didėja.

12.1.4 paveiksle pavaizduota vandens garų spaudimo izoterma. Grafiko taškai *A*, *B*, *C*, *D*, *E* ir *F* atitinka 12.1.3 paveiksle nurodytas garų būsenas. Atliekant bandymus su alkoholio, eterio ir kitų medžiagų garais, nustatyta, kad skirtingų medžiagų sočiųjų garų slėgis yra nevienodas.



12.1.3 pav.

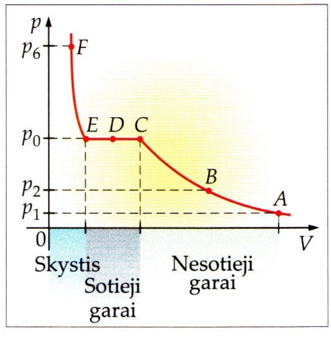
Sočiųjų garų slėgio priklausomybė nuo temperatūros

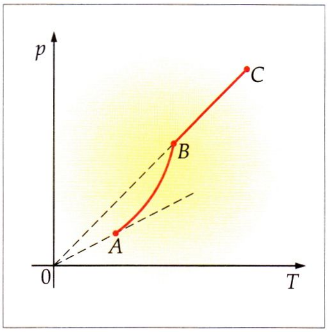
Įsitikinome, kad sočiųjų garų slėgis nepriklauso nuo tūrio. O kaip jis susijęs su temperatūra? Norėdami atsakyti į šį klausimą, galime remtis idealiųjų dujų būsenos lygtimi

$$p_0 = nkT. \tag{12.1}$$

Iš jos matyti, kad sočiųjų garų slėgis turėtų būti tiesiogiai proporcingas temperatūrai. Bandymai rodo, kad sočiųjų garų slėgio priklausomybė nuo temperatūros $p_0(T)$ nėra tokia pati kaip pastovaus tūrio

12.1.4 pav.





12.1.5 pav.

idealiųjų dujų. 12.1.5 paveiksle idealiųjų dujų izochoros pavaizduotos brūkšninėmis linijomis, o sočiųjų garų slėgio priklausomybė nuo temperatūros – ištisinė linija. Kylant temperatūrai, sočiųjų garų slėgis didėja sparčiau negu idealiųjų dujų (12.1.5 pav., kreivės dalis *AB*). Mat jis didėja ne tik dėl to, kad, kylant temperatūrai, didėja molekulių judėjimo greitis, bet ir dėl to, kad, garuojant kaitinamam skysčiui, didėja garų koncentracija ($p \sim n$).

Kai visas skystis išgaruoja, toliau kaitinami garai nustoja būti sotieji ir jų slėgis pasidaro tiesiogiai proporcingas absoliučiajai temperatūrai (12.1.5 pav., dalis *BC*).

Apibendrindami galime suformuluoti tokią išvadą: ***sočiųjų garų slėgis nepriklauso nuo tūrio, tačiau priklauso nuo temperatūros.***

Klausimai ir užduotys

1. Paaiškinkite, kodėl sočiųjų garų slėgis nepriklauso nuo tūrio.

2. Paaiškinkite, kodėl sočiųjų garų slėgis priklauso nuo temperatūros.

3. Palyginkite idealiųjų dujų ir sočiųjų garų slėgio priklausomybę nuo temperatūros. Nurodykite panašumus ir skirtumus.

12.2. Virimas. Kritinė temperatūra

Pagrindinės sąvokos

Vìrimas,
krìtinė temperatūrà.

Virimas

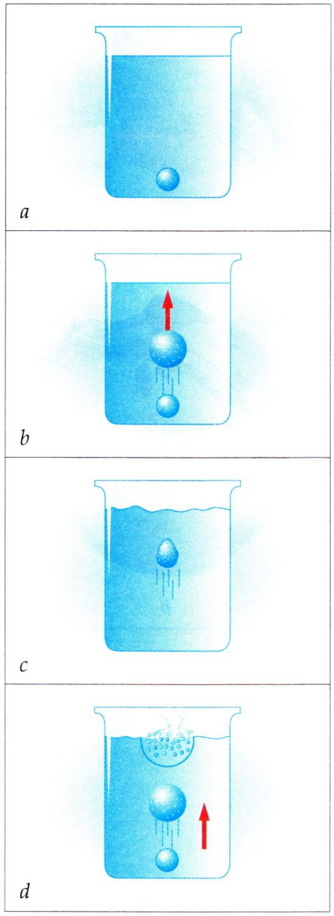
Apie virimą buvo užsiminta nagrinėjant fazinius virsmus (žr. 11.2 temą). Šioje temoje jį aptarsime detaliau. ***Vìrimas*** – vyksmas, kurio metu skystis garuoja ne tik iš paviršiaus, bet ir iš vidaus. Pradedant nagrinėti virimą, tenka prisiminti, kad skystyje yra ištirpusių dujų, kurios mažais burbuliukais kaupiasi ant indo dugno, sienelių ir skystyje esančių dulkelių (12.2.1 pav., *a*). Kaitinamas skystis garuoja į burbuliukų vidų. Dėl to jų tūris ima didėti. Kartu didėja ir Archimedo

jėga, kelianti burbuliukus aukštyn (12.2.1 pav., *b*). Kylantys burbuliukai patenka į viršutinius, dar neįšilusius skysčio sluoksnius. Čia jie pradeda mažėti (nes mažėja garų slėgis) ir galiausiai visai pranyksta (12.2.1 pav., *c*). Slėgis mažėja staiga, todėl burbuliukai susitraukia taip greitai, kad susidauždamos jų sienelės sukelia garsą, panašų į mažą sprogimą. Dėl daugybės tokių mažų sprogimų atsiranda virimui būdingas ūžesys. Prieš pradedant virti skysčiui, tas ūžesys išnyksta, nes skystyje burbuliukai nebesproginėja. Jie iškyla į skysčio paviršių ir tik tada sprogsta (12.2.1 pav., *d*). Iš burbuliukų garai išsiveržia į aplinką.

Svarbus skysčio virimą apibūdinantis dydis yra virimo temperatūra[1]. Ji priklauso nuo išorinio slėgio. Norėdami tai pagrįsti, remsimės pagrindine skysčio virimo sąlyga: skystis pradeda virti tokioje temperatūroje, kurioje jo sočiųjų garų slėgis burbuliukuose yra ne mažesnis už išorinį slėgį, t. y.

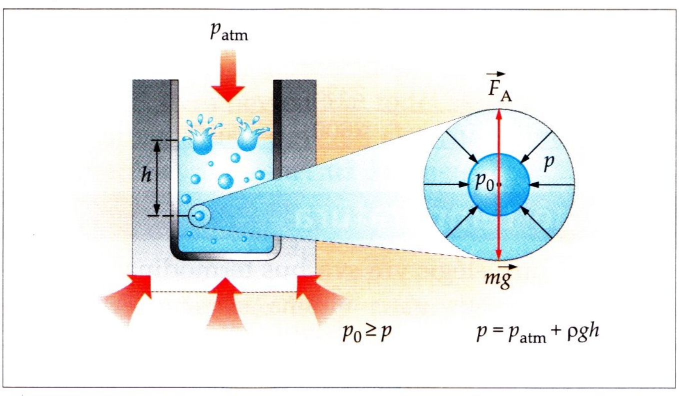
$$p_0 \geq p_{atm} + \rho g h. \tag{12.2}$$

Šioje formulėje dėmuo p_{atm} yra atmosferos slėgis, o dėmuo $\rho g h$ – hidrostatinis slėgis (12.2.2 pav.). Iš skysčio virimo sąlygos paaiškėja, kad skysčio virimo temperatūra priklauso nuo išorinio slėgio. Kuo jis didesnis, tuo aukštesnė virimo temperatūra. Pavyzdžiui, garo katile, kuriame slėgis siekia $1{,}6 \cdot 10^6$ Pa, vanduo neverda ir įkaitęs iki 200 °C. Hermetiškuose induose – autoklavuose, kuriuos medicinos įstaigos naudoja vandeniui virinti (12.2.3 pav., *a*), slėgis taip pat yra didesnis už atmosferos. Todėl vandens virimo temperatūra juose aukštesnė kaip 100 °C. Autoklavuose

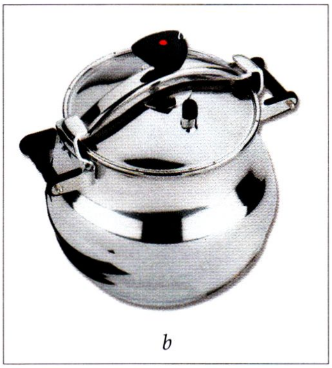


12.2.1 pav.

12.2.2 pav.



[1] Virimo temperatūros sąvoka buvo apibrėžta 11.2 temoje.



12.2.3 pav.

sterilizuojami chirurginiai instrumentai, tvarsliava ir t. t. Padidėjusio slėgio sąlygomis maistas gaminamas ir greitpuodyje (12.2.3 pav., *b*). Kai temperatūra aukštesnė nei 100 °C, cheminių reakcijų greitis kas 10 °C padvigubėja. Vadinasi, puode, kuriame vanduo užverda sušilęs iki 120 °C, maistas pagaminamas keturis kartus sparčiau.

Išoriniam slėgiui mažėjant, skysčio virimo temperatūra krinta. Antai Čiurliónio viršūnėje (Pamỹro kalnuose), kurios aukštis 5794 m, vanduo užverda įkaitęs tik iki 80 °C. Tokiomis sąlygomis maisto išvirti neįmanoma. Aukščiausioje pasaulyje viršukalnėje Džomolùngmoje (Himalãjai), kur oro slėgis yra vos 37 kPa (0,4 atm), vandens virimo temperatūra dar žemesnė. Ji tesiekia 74 °C.

Įvairių skysčių virimo temperatūra yra skirtinga, mat skiriasi jų sočiųjų garų slėgis. Kuo jis didesnis, tuo žemesnė virimo temperatūra, nes žemesnėje temperatūroje sočiųjų garų slėgis susilygina su atmosferos slėgiu (12.2). Pavyzdžiui, kai virimo temperatūra 100 °C, vandens sočiųjų garų slėgis lygus 101 325 Pa (760 mm Hg), o gyvsidabrio – 117 Pa (0,88 mm Hg). Kai išorinis slėgis lygus 1 atm, gyvsidabris verda įkaitęs iki 357 °C. Kai kurių kitų medžiagų virimo temperatūra nurodyta 1 lentelėje.

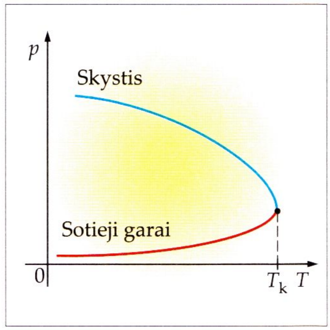
1 lentelė

Medžiaga	Virimo temperatūra, °C
Helis	–268,9
Vandenilis	–252,9
Azotas	–195,2
Deguonis	–182,9
Vanduo	100
Švinas	1620
Sidabras	1950
Varis	2336
Auksas	2600

Kritinė temperatūra

Sočiųjų garų slėgis yra svarbus termodinaminis dydis, apibūdinantis garų virsmą skysčiu. Atvirkščią vyksmą – skysčio virsmą garais – nusako kitas dydis, vadinamas ***krìtine temperatūrà***. Norėdami suprasti jos

esmę, įsivaizduokime uždarą indą su skysčiu. Kaitinant indą, skysčio temperatūra kyla, kartu didėja ir sočiųjų garų slėgis bei tankis. Skysčio, pusiausviro su savo garais, tankis, atvirkščiai, mažėja, nes kaitinamas skystis plečiasi. Pasiekus tam tikrą temperatūrą, skirtumas tarp skysčio ir jo sočiųjų garų fizinių savybių išnyksta. Ši temperatūra ir vadinama kritine.



12.2.4 pav.

Kritinę temperatūrą galima nustatyti grafiškai. Tereikia vienoje koordinačių plokštumoje nubraižyti skysčio ir jo garų tankio priklausomybės nuo temperatūros kreives. Skystį atitinkanti kreivė leidžiasi žemyn, o vaizduojanti garus kyla į viršų (12.2.4 pav.). Esant kritinei temperatūrai, abi kreivės susijungia, t. y. skysčio tankis susilygina su garų tankiu.

Įvairių medžiagų kritinė temperatūra yra nevienoda (žr. 2 lentelę).

2 lentelė

Medžiaga	Kritinė temperatūra
Helis	–268
Vandenilis	–240
Azotas	–147
Deguonis	–118
Chloras	146
Eteris	194
Gyvsidabris	1460

Kodėl skiriasi įvairių medžiagų kritinė temperatūra, nesunku suprasti prisiminus medžiagos sandarą. Kad dujos galėtų virsti skysčiu, jų molekulių sąveikos potencinė energija turi būti didesnė už kinetinę energiją:

$$E_p \geq \frac{3}{2}kT. \qquad (12.3)$$

Įvairių medžiagų molekulių sąveikos potencinė energija (E_p) yra nevienoda, todėl skiriasi ir jų kritinė temperatūra. Dujas paversti skysčiu galima tik esant temperatūrai, žemesnei už kritinę:

$$T < T_{kr} = \frac{2|E_p|}{3k}. \qquad (12.4)$$

Remiantis kritinės temperatūros samprata, galima paaiškinti, kuo skiriasi garai ir dujos. Garais vadinamos dujinės medžiagos, kurių temperatūra žemesnė

už kritinę. Dujų temperatūra įprastomis sąlygomis yra aukštesnė už kritinę. Norint dujas suskystinti, reikia pirma jas atšaldyti žemiau kritinės temperatūros, o tada suslėgti.

Klausimai ir užduotys

1. Kaip kinta skysčio virimo temperatūra, kai slėgis didėja; mažėja? Kokios yra šių reiškinių priežastys?

2. Kodėl virimui didesnę įtaką turi burbuliukuose esančių sočiųjų garų, o ne juose esančio oro slėgio padidėjimas?

3. Kokią temperatūrą vadiname kritine?

4. Kodėl skiriasi įvairių dujų kritinė temperatūra?

5. Kodėl verdančio skysčio temperatūra yra pastovi, kai išorinis slėgis nekinta?

6. Kaip užvirinti skystį, aušinant indą?

12.3. Oro drėgnis. Jo matavimo prietaisai

Pagrindinės sąvokos

Óro drẽgnis,
vandeñs garų̃ dalìnis slė̃gis,
absoliutùsis óro drẽgnis,
santykìnis óro drẽgnis,
rasõs tãškas,
psichromètras,
higromètras.

Oro drėgnis

Ore visada yra tam tikras kiekis vandens garų. Garuoja vandenynų, jūrų, ežerų ir upių paviršius. Orui judant, vienose Žemės vietose tuo pačiu metu vandens daugiau išgaruoja negu kondensuojasi, kitose – atvirkščiai. Vandens garų kiekis ore vadinamas ***óro drėgniù***. Mažesnis oro drėgnis skatina intensyvesnį vandens garavimą nuo kūno paviršiaus, dėl to žmogus gali peršalti, gali išsausėti jo oda ir gleivinės. Kai oro drėgnis didelis, garavimas nuo žmogaus kūno paviršiaus sulėtėja. Dėl to pablogėja žmogaus termoreguliacija ir organizmas gali perkaisti.

Oro drėgnis daro įtaką ne tik žmogaus organizmui. Jis svarbus muziejuose, nes užtikrina meno kūrinių ir kitų eksponatų konservavimo bei restauravimo kokybę. Žinios apie oro drėgnį aktualios namų šeimininkėms. Mat daugeliui maisto produktų laikyti ar konditeriniams gaminiams gaminti reikalingas atitin-

kamas oro drėgnis. Tinkamą oro drėgnį reikia palaikyti ir odos apdirbimo įmonėse. Kai oras per sausas, oda perdžiūva, o kai per drėgnas, ją gali sugadinti mikroorganizmai. Dėl panašių priežasčių pavojus kyla ir kai kuriems žemės ūkio produktams. Drėgnu oru susidaro palankios sąlygos daugintis netikrosios miltligės sukėlėjams, kurie pažeidžia svogūnus, agurkus ir kitas daržoves. Nustatyti oro drėgnį svarbu ir meteorològijoje, sudarant orų prognozes.

Oro drėgnį apibūdina šie fizikiniai dydžiai: vandens garų dalinis slėgis ir santykinis oro drėgnis.

Absoliutusis oro drėgnis. Vandens garų dalinis slėgis

Atmosferoje yra įvairių dujų ir vandens garų. Ore esančių vandens garų masės ir tūrio santykis vadinamas ***absoliučiúoju óro drėgniù***. Kitaip tariant, absoliutusis oro drėgnis yra ore esančių vandens garų tankis (ρ). Beveik visi vandens garai susitelkę apatiniame, maždaug 10 km storio atmosferos sluoksnyje. Jų kiekis įvairiose geografinėse platumose labai skiriasi. Antai pusiaujyje vandens garų koncentracija yra apie 2,6 %, o ties ašigaliais – vos 0,2 %. Meteorologijoje absoliutusis oro drėgnis gali būti apibūdinamas ne garų tankiu, o slėgiu (p). Vandens garų slėgis, kai nepaisoma visų kitų dujų, vadinamas ***vandeñs garų̃ daliniù slėgiù***. Jis matuojamas slėgio vienetais – paskaliais (Pa) arba gyvsidabrio stulpelio milimetrais (mm Hg).

Santykinis oro drėgnis

Vandens garų dalinis slėgis apibūdina oro drėgnį, tačiau nerodo, kiek toli vandens garai tomis sąlygomis yra iki sočiųjų. O būtent nuo to priklauso vandens garavimo intensyvumas, taigi ir drėgmės kiekis, kurio netenka gyvieji organizmai. Todėl vartojamas kitas fizikinis dydis – ***santykìnis óro drė̃gnis***. Jis rodo, kiek artimi yra tam tikros temperatūros vandens garai sotiesiems.

Santykiniù óro drėgniù φ vadinamas ore esančių vandens garų dalinio slėgio p ir oro temperatūros sočiųjų vandens garų slėgio p_0 santykis, išreikštas procentais:

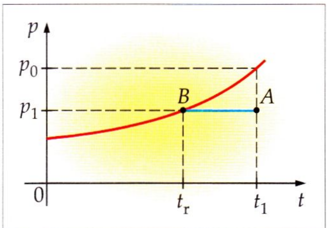
$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\ \%. \qquad (12.5)$$

Kai santykinis drėgnis mažas, garavimas vyksta intensyviai, kai didelis – lėtai. Jei oro temperatūra siekia 20–25 °C, palankiausias žmogaus organizmui santykinis oro drėgnis yra apie 50 %. Kai jis lygus 100 %, garai virsta sočiaisiais ir tarp garavimo bei kondensacijos nusistovi dinaminė pusiausvyra. Vandens kiekis tokiame ore išlieka pastovus.

Santykinį drėgnį galima išreikšti ne tik vandens garų slėgių, bet ir tankių santykiu. Jis lygus ore esančių vandens garų tankio (ρ) ir sočiųjų garų tankio (ρ_0) santykiui:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\ \%. \qquad (12.6)$$

Rasos taškas



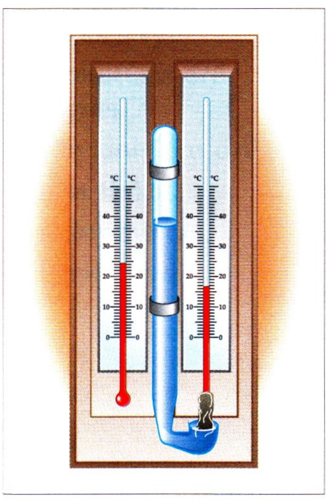
12.3.1 pav.

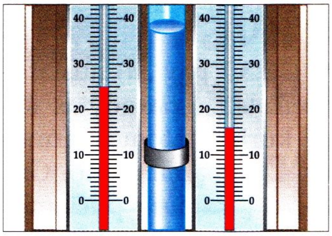
Pastovaus slėgio nesotieji garai aušinami anksčiau ar vėliau virsta sočiaisiais. ***Temperatūra t_r, kurioje vandens garai virsta sočiaisiais, vadinama rasõs taškù.*** Orą atvėsinus iki rasos taško, garai pradeda kondensuotis, atsiranda rūkas, iškrinta rasa. Nustatyta, kad nakties rasos formavimosi greitis yra apie 0,06–0,07 mm, kai oras prisotintas vandens garų. Neprisotintame garų ore šis greitis yra mažesnis.

Naudojantis sočiųjų garų slėgio priklausomybės nuo temperatūros lentele (žr. 2 priedą), pagal rasos tašką nustatomas ore esančių vandens garų dalinis slėgis (p). Žinant rasos tašką, taip pat galima apskaičiuoti santykinį oro drėgnį. Sakykime, esant temperatūrai t_1, vandens garai ore yra nesotieji, o jų dalinis slėgis lygus p_1 (12.3.1 pav.). Šią garų būseną vaizduoja taškas A. Nekintant slėgiui, garai aušinami, kol virsta sočiaisiais. Naują jų būseną (tašką B) atitinka rasos taškas t_r. Pagal jį sočiųjų garų slėgio priklausomybės nuo temperatūros lentelėje randama atitinkama vandens garų dalinio slėgio vertė p_1. Iš tos pačios lentelės sužinoma, koks sočiųjų garų slėgis p_0 atitinka temperatūrą t_1. Tada pagal (12.5) formulę apskaičiuojamas santykinis oro drėgnis. Pavyzdžiui, apskaičiuokime santykinį oro drėgnį, kai oro temperatūra lygi 20 °C, o rasos taškas yra 13 °C. Lentelėje (žr. 3 priedą) 13 °C atitinka 11,2 mm Hg slėgis, o 20 °C – 17,5 mm Hg slėgis, todėl santykinis oro drėgnis

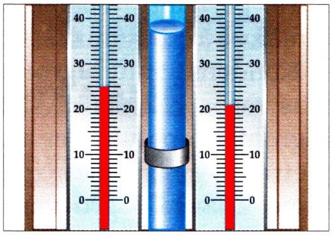
$$\varphi = \frac{11{,}2\ \text{mm Hg}}{17{,}5\ \text{mm Hg}} \cdot 100\ \% = 64\ \%. \qquad (12.7)$$

12.3.2 pav.

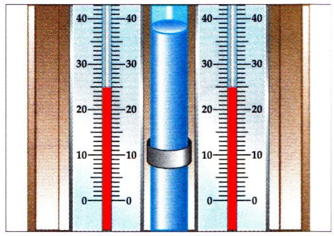




12.3.3 pav.



12.3.4 pav.



12.3.5 pav.

Psichrometras

Santykinis oro drėgnis matuojamas ***psichrometrù*** (gr. *psychros* – šaltas, *metron* – matas; 12.3.2 pav.). Jį sudaro du termometrai – sausas ir drėkinamas. Sausas termometras rodo oro temperatūrą. Drėkinamo termometro rezervuaras apvyniotas drobinio arba kitokio higroskopinio audinio atraiža, o šios vienas galas įmerktas į vandenį. Drėkinamas termometras rodo žemesnę temperatūrą negu sausas, nes, vandeniui garuojant, atvėsta.

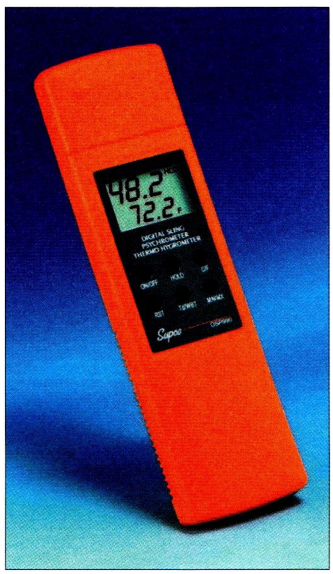
• Kuo sausesnis oras, t. y. kuo mažesnis santykinis jo drėgnis, tuo labiau skiriasi termometrų rodmenys. Taip yra dėl to, kad vanduo iš audinio garuoja intensyviau ir drėkinamo termometro rodoma temperatūra yra žemesnė (12.3.3 pav.).

• Kuo didesnis santykinis oro drėgnis, tuo mažesnis termometrų rodmenų skirtumas. Mat garavimas yra lėtesnis, o dėl to drėkinamo termometro rodoma temperatūra – aukštesnė (12.3.4 pav.).

Kai santykinis oro drėgnis lygus 100 %, vanduo negaruoja ir abu termometrai rodo vienodą temperatūrą (12.3.5 pav.).

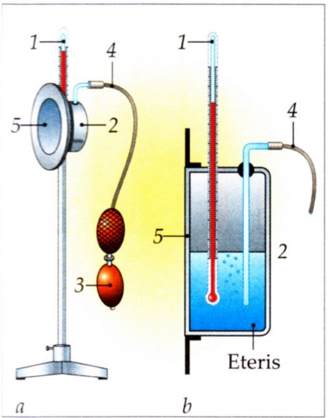
Pagal abiejų termometrų rodomų temperatūrų skirtumą ir sauso termometro rodmenį specialiose psichrometrinėse lentelėse (žr. 4 priedą) galima rasti santykinio oro drėgnio vertę. Buityje oro drėgnis matuojamas psichrometrais, kurie iš karto rodo santykinį oro drėgnį ir temperatūrą (12.3.6 pav.).

12.3.6 pav.



Higrometras

Kai oro temperatūra žemesnė negu –5 °C, ore yra mažai vandens garų, todėl psichrometro tikslumas nedidelis. Tada vietoj psichrometro naudojamas plaukìnis ***higromètras*** (gr. *hygros* – drėgnas, *metron* – matas). Jo veikimas pagrįstas žmogaus plauko, nuo



12.3.7 pav.

kurio pašalinti riebalai, savybe ilgėti didėjant santykiniam oro drėgniui.

Kondensãciniu higrometrù (12.3.7 pav., *a*) nustatomas rasos taškas. 12.3.7 paveiksle, *b*, parodytas šio higrometro pjūvis. Per angą, į kurią įstatomas termometras *1*, į higrometro kamerą *2* įpilama eterio. Gumine kriauše *3* pro vamzdelį *4* į kamerą pučiamas oras. Taip pagreitinamas eterio garavimas. Eteriui auštant, higrometro priekinė nupoliruota sienelė *5* aprasoja. Termometro rodmenys fiksuojami tuo momentu, kai pasirodo rasos lašeliai. Taip nustatomas rasos taškas. Jį žinant, galima rasti vandens garų dalinį slėgį ir santykinį oro drėgnį.

Klausimai ir užduotys ??

1. Drėgnu oru sugarbanoti plaukai praranda savo formą. Paaiškinkite šį reiškinį.

2. Fizikiniu požiūriu paaiškinkite mįslę: „Vaikščiojo mergaitė po pievą ir išbarstė perlus. Mėnulis matė – nesakė. Saulė kėlėsi – surinko."

3. Kai oro temperatūra yra 30 °C, vandens garų slėgis lygus 2,52 kPa. Apskaičiuokite santykinį oro drėgnį, atsižvelgdami į tai, kad sočiųjų garų slėgis, esant šiai temperatūrai, lygus 4,2 kPa. (60 %)

4. Remdamiesi 12.3.3–12.3.5 paveiksle pavaizduotų termometrų rodmenimis, kiekvienu atveju apskaičiuokite santykinį oro drėgnį.

5. Oro temperatūra kambaryje 18 °C, o rasos taškas 10 °C. Apskaičiuokite kambario oro santykinį drėgnį. (59 %)

6. Psichrometro drėkinamas termometras rodo 10 °C, o sausas – 14 °C. Apskaičiuokite vandens garų:

a) santykinį drėgnį; (60 %)
b) dalinį slėgį; (0,96 kPa)
c) tankį. (7,3 g/m^3)

7. Darbo kambario tūris 50 m^3, oro temperatūra jame 15 °C, o santykinis drėgnis 60 %. Apskaičiuokite ore esančių vandens garų masę. (384 g)

8. Apibūdindamas vienos liepos mėnesio dienos orus, sinoptikas per radiją pranešė, kad dieną oro temperatūra bus 20 °C, o santykinis drėgnis 70 %. Naktį temperatūra nukris iki 10 °C.

a) Įrodykite, kad naktį iškris rasa.
b) Apskaičiuokite, kiek vandens susidarys iš kiekvieno kubinio metro oro. (7,9 g)

12.4. Paviršiaus įtemptis. Paviršiaus įtempties jėga

Skysčių sandara ir savybės

Su skysčių sandara susipažinote žemesnėse klasėse, taigi žinote, kad jų molekulės išsidėsčiusios arti viena kitos. Todėl skysčiai yra mažai spūdūs. Molekulės gali judėti viena kitos atžvilgiu, nors jos dažniau tik svyruoja, kartais sukimba su gretimomis, sudarydamos nedideles grupes. Kai skystis neteka, jo molekulės peršoka iš vienos pusiausvyros padėties į kitą visomis kryptimis vienodai.

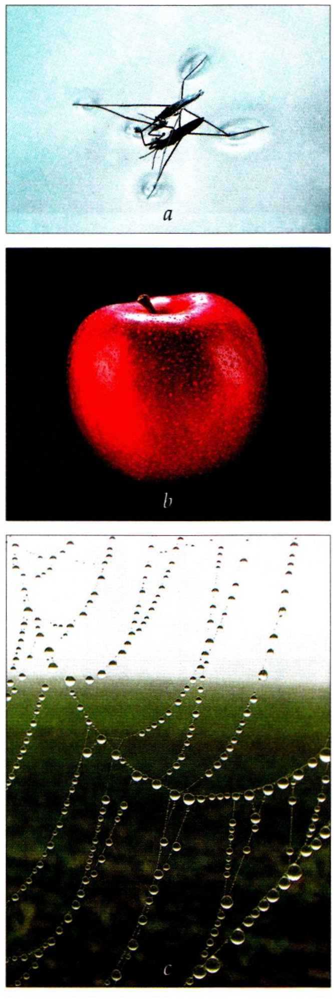
Veikiamas išorinės jėgos (pavyzdžiui, sunkio), skystis ima tekėti išlaikydamas savo tūrį ir įgydamas indo formą. Toks jis yra dėl to, kad molekulės peršoka iš vienos pusiausvyros padėties į kitą jėgos veikimo kryptimi.

Šioje temoje apie skysčius sužinosite daugiau. Paaiškės, kodėl čiuožikas gali lengvai bėgioti vandens paviršiumi (12.4.1 pav., *a*), o rasos lašeliai yra rutulio formos (12.4.1 pav., *b*, *c*). Tačiau pirma išsiaiškinkime, kaip atsiranda paviršiaus įtempties jėga.

Pagrindinės sąvokos

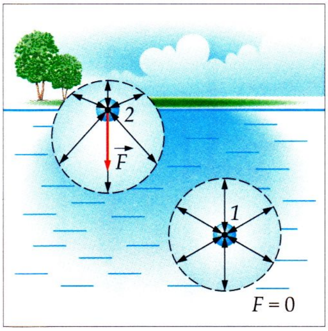
Pavir̃šiaus įtemptiẽs jėgà,
pavir̃šiaus įtemptiẽs koeficieñtas.

12.4.1 pav.



Skysčių paviršiaus įtempties jėgų kilmė

Skysčio viduje esančią molekulę (brėžinyje ji pažymėta *1* numeriu) gretimos molekulės veikia traukos jėgomis, kurios kompensuojasi (12.4.2 pav.). Molekulę, kuri yra skysčio paviršiuje (2 molekulę), veikia ne tik skysčio, bet ir oro molekulės (12.4.2 pav.). Kadangi pastarųjų poveikis jai yra silpnesnis negu gretimų skysčio molekulių, tai *2* molekulę veikiančių jėgų atstojamoji $\vec{F}$ nelygi nuliui. Ji nukreipta žemyn, į skystį. Taigi ši molekulė turėtų būti įtraukta į skysčio vidų. Tačiau ji ten patekti negali, nes laisvos vietos nėra. Todėl 2 molekulė, kaip ir dauguma paviršinių molekulių, lieka savo vietoje. Molekulinių jėgų veikiamas paviršiaus sluoksnis slegia skystį, sudarydamas molekulinį slėgį. Jis yra nepaprastai didelis (pavyzdžiui, vandenyje jis siekia apie $1{,}1 \cdot 10^9$ Pa). Molekulinis



12.4.2 pav.

12.4.3 pav.

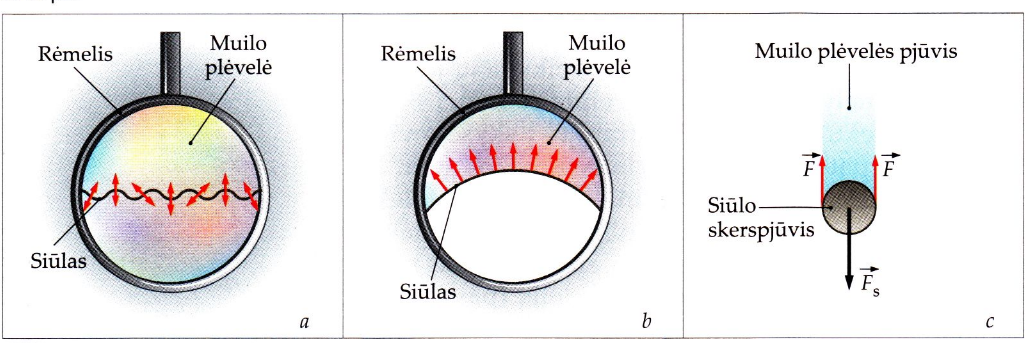
slėgis neturi įtakos skystyje panardintam kūnui, jis veikia tik vidinių skysčio sluoksnių molekules, sudarydamas plėvelės įspūdį. Dėl šios plėvelės vandens paviršiumi gali bėgti čiuožikas ir kiti vandens gyvūnėliai, ant vandens laikosi adata ar mažytė sąvaržėlė. Iš čiaupo lašantys vandens lašai atrodo tarytum įpilti į elastingą maišelį (12.4.3 pav.).

Kiekviena skysčio paviršiaus sluoksnio molekulė, veikiama molekulinio slėgio, turi potencinės energijos. Žinome, kad kiekviena sistema savaime pereina į tokią būseną, kurioje jos potencinė energija yra mažiausia. Dėl to skysčio paviršius stengiasi susitraukti tiek, kad užimtų kuo mažesnį plotą. Kai kurioms paviršiaus molekulėms vis dėlto pavyksta patekti į skysčio vidų. Skysčio paviršiaus plotas dėl to sumažėja. Kuo mažesnis paviršiaus plotas, tuo mažesnė jo energija ir stabilesnė būsena. Mažiausias yra rutulio paviršiaus plotas. Todėl bet kurios rūšies skysčio lašeliai yra apvalūs. Erdvėlaivyje, būdamas nesvarus, rutulio formą įgyja ir palyginti didelis skysčio kiekis.

Paviršiaus įtempties jėga

Paviršiaus įtempties jėgą galima stebėti atliekant nesudėtingą bandymą su vielos rėmeliu, prie kurio per vidurį pririštas siūlas. Įmerkus rėmelį į muilo tirpalą, žiedo viduje susidaro plėvelė. Joje atsidūręs siūlas yra neįtemptas (12.4.4 pav., *a*). Pradūrę plėvelę vienoje siūlo pusėje, pastebime, kad susitraukdamas plėvelės paviršius ištempia siūlą (12.4.4 pav., *b*). Tai daro paviršiaus įtempties jėga. ***Jėga, kuri veikia skysčio paviršiaus liestinės kryptimi statmenai linijai, ribojančiai tą paviršių, ir stengiasi sumažinti jį iki minimumo, vadinama paviršiaus įtempties jėga*** (12.4.4 pav., *c*).

12.4.4 pav.



Paviršiaus įtempties koeficientas

Tarkime, kad siūlo ilgis (12.4.4 pav.) yra l_0. Paimkime didesnio skersmens rėmelį ir prie jo pririškime ilgesnį siūlą, kurio ilgis yra l. Akivaizdu, kad plėvelės paviršiaus įtempties jėga, veikianti siūlą, padidės. Tačiau jos ir siūlo ilgio santykis išliks pastovus. ***Paviršiaus įtempties jėgos $\vec{F}$, kuri veikia ilgio l paviršiaus kontūrą, modulio ir to ilgio santykis vadinamas pavir̃šiaus įtemptiẽs koeficientù*** ir žymimas raide σ (tariama „sigma“):

$$\sigma = \frac{F}{l}. \tag{12.8}$$

Jo matavimo vienetas yra *niùtonas mètrui* $\left(\frac{\text{N}}{\text{m}}\right)$.

Paviršiaus įtempties koeficientas priklauso nuo besiribojančių terpių kilmės ir temperatūros. Temperatūrai didėjant, skirtumas tarp skysčio ir jo sočiųjų garų mažėja. Pasiekus kritinę temperatūrą, jis visiškai išnyksta. Todėl, temperatūrai kylant, paviršiaus įtempties koeficientas skysčio ir sočiųjų garų sandūroje mažėja, o kritinėje temperatūroje pasidaro lygus nuliui.

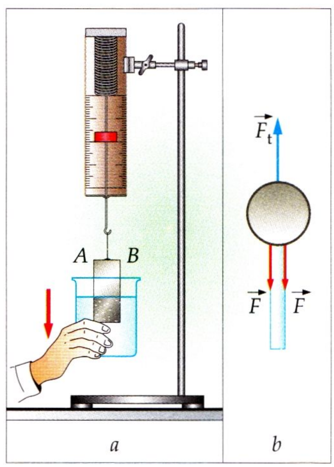
Iš (12.8) formulės galima išreikšti ilgio l paviršių sandūroje veikiančios įtempties jėgos modulį:

$$F = \sigma \cdot l. \tag{12.9}$$

Paviršiaus įtempties jėgos matavimas

Paviršiaus įtempties jėgą nesunku nustatyti bandymais. Vielos rėmelis, kurio kraštinės AB ilgis l, prikabinamas prie dinamometro (12.4.5 pav., *a*). Rėmelį veikiantį sunkį $\vec{F}_s$ atsveria dinamometro spyruoklės tamprumo jėga $\vec{F}_t$: $\vec{F}_t = -m\vec{g}$. Po rėmeliu pakištas indas su muilo tirpalu kilstelimas aukštyn, kad kraštinė AB pasinertų tirpale. Paskui indas iš lėto leidžiamas žemyn. Tarp rėmelio kraštinių susidaro muilo plėvelė, o dinamometro spyruoklė išsitempia, nes rėmelio kraštinę AB žemyn traukia plėvelės paviršiaus įtempties jėga. Atkreipiame dėmesį į tai, kad paviršiaus įtempties jėga veikia iš abiejų plėvelės pusių, todėl rėmelis yra traukiamas jėga $2\vec{F}$; čia $\vec{F}$ – paviršiaus įtempties jėga, veikianti kraštinę AB iš vienos

12.4.5 pav.



plėvelės pusės (12.4.5 pav., *b*). Kompensuodama paviršiaus įtempties jėgos poveikį, spyruoklės tamprumo jėga įgyja tam tikrą vertę F_{t1}.

Kai rėmelis yra pusiausviras, jį veikiančių jėgų atstojamoji lygi nuliui:

$$\vec{F}_{t1} + m\vec{g} + 2\vec{F} = 0. \tag{12.10}$$

Vektorinę lygtį pakeiskime skaliarine:

$$F_{t1} - mg - 2F = 0. \tag{12.11}$$

Kadangi $F_t = mg$, tai iš (12.11) lygties gauname:

$$F = \frac{F_{t1} - mg}{2} = \frac{F_{t1} - F_t}{2}. \tag{12.12}$$

Į šią formulę įrašę tamprumo jėgų vertes, galime apskaičiuoti rėmelio kraštinę veikiančią paviršiaus įtempties jėgą.

Klausimai ir užduotys ? ?

1. Kokia yra paviršiaus įtempties jėgų kilmė?

2. Paviršiaus įtempties jėgą palyginkite su tamprumo jėga. Kuo jos panašios ir kuo skiriasi? Pateikite šių jėgų pavyzdžių.

3. Kas yra paviršiaus įtempties koeficientas? Nuo ko jis priklauso?

4. Kodėl erdvėlaivyje papurškus vandens susiformuoja rutulio formos lašai?

5. Remdamiesi 12.4.5 paveiksle pavaizduotu bandymu, apskaičiuokite:

a) kokia jėga muilo plėvelė veikia rėmelio kraštinę *AB*, kai jos ilgis lygus 3 cm; (2,4 mN)

b) kokį darbą reikia atlikti, norint pastumti tą kraštinę 1 cm. (24 μJ)

6. Marija išpūtė 4 cm skersmens muilo burbulą. Kokį darbą atliko mergina? Muilo plėvelės įtempties koeficientas 0,043 N/m. (432 μJ)

7. Vandens paviršiaus įtempties koeficientui nustatyti naudojama pipetė, kurios angos skersmuo 2 mm. Pro ją iš pipetės išlašėjusių 20 vandens lašų masė lygi 0,95 g. Apskaičiuokite vandens paviršiaus įtempties koeficientą. ($7{,}4 \cdot 10^{-2}$ N/m)

8. Arbatinio dugne išgręžta apskrita skylutė, kurios skersmuo d = 0,1 mm. Iki kokio aukščio h į arbatinį galima pilti vandens, kad jis pro skylutę netekėtų? (h = 0,29 m)

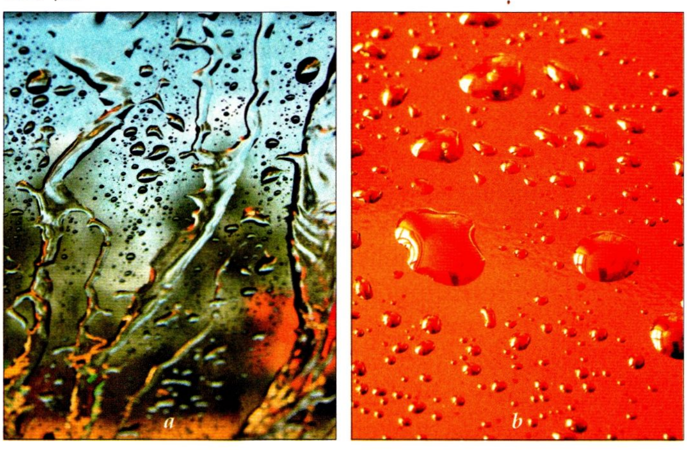
12.5. Drėkinimas. Kapiliariniai reiškiniai

Drėkinimo reiškinio samprata

Nagrinėdami paviršiaus įtempties jėgas, sužinojote, kodėl skysčio lašeliai yra rutulio formos. Tačiau tokie jie būna ne visada. Kai lašelis susiliečia su kietojo kūno paviršiumi, jo forma pasikeičia. Šis pasikeitimas priklauso nuo medžiagos, iš kurios pagamintas kietasis kūnas. Tikriausiai pastebėjote, kad, patekę ant automobilio lango stiklo, lietaus lašeliai praranda savo formą – pasklinda sudarydami mažas vandens sroveles (12.5.1 pav., *a*). Tačiau, užlašinti ant parafino, jie įgyja suploto rutuliuko formą (12.5.1 pav., *b*). Taigi skysčio ir kietojo kūno sąveika yra dvejopa. Ją lemia skysčio ir kietojo kūno molekulių sąveikos jėgos.

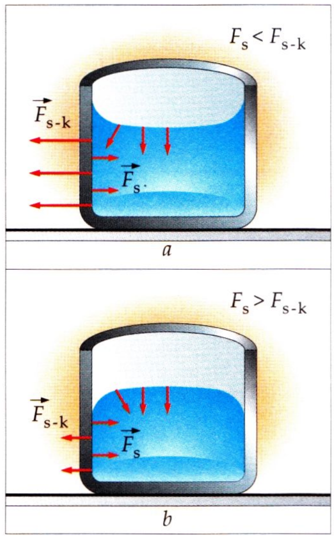
Kai skysčio molekulių sąveikos jėgos yra mažesnės už skysčio ir kietojo kūno molekulių sąveikos jėgas, sakoma, kad skystis kietąjį kūną drėkina (12.5.2 pav., *a*), ***kai didesnės – nedrėkina*** (12.5.2 pav., *b*). Tas pats skystis vienus kūnus drėkina, o kitų – ne. Pavyzdžiui, vanduo drėkina medį ir stiklą, tačiau nedrėkina plastilino, vaško ir parafino. Taigi ***drėkìnimas*** yra skysčio laisvojo paviršiaus išlinkimas prie kietojo kūno paviršiaus dėl skysčio ir kietojo kūno molekulių sąveikos.

12.5.1 pav.

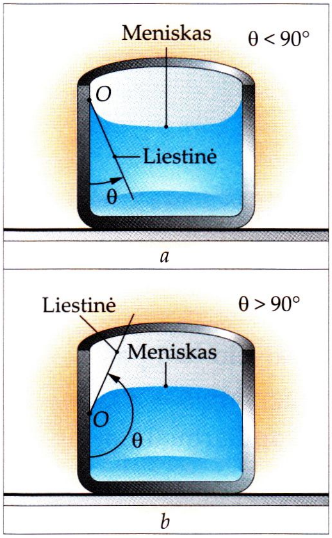


Pagrindinės sąvokos

Drėkìnimas,
menìskas,
sąlyčio kam̃pas,
papìldomas slė̃gis,
kapiliãriniai reiškiniaĩ.



12.5.2 pav.



12.5.3 pav.

Drėkinimą apibūdinantys dydžiai

Drėkinimas apibūdinamas dviem fizikiniais dydžiais: meniskù (gr. *meniskos* – mėnulio pjautuvas) ir sąlyčio kampù. ***Meniskù*** vadinamas lenktas skysčio paviršius, o ***sąlyčio kampù*** θ – kampas tarp kietojo kūno paviršiaus ir skysčio paviršiaus liestinės, nubrėžtos per lietimosi tašką *O* (12.5.3 pav.). Remdamiesi sąlyčio kampo sąvoka, aptarkime keturis skirtingus skysčio sąveikos su kietuoju kūnu atvejus.

- Kai skystis drėkina kietąjį kūną, sąlyčio kampas yra smailusis (θ < 90°). Drėkinantis skystis tarsi prilimpa prie indo sienelių, prie jų pakyla aukščiau (12.5.3 pav., *a*). Užpiltas ant kietojo kūno paviršiaus, toks skystis pasklinda (žr. 12.5.1 pav., *a*).
- Kai skystis nedrėkina kietojo kūno, sąlyčio kampas yra bukasis (θ > 90°). Nedrėkinantis skystis tarytum atšoka nuo indo sienelių, ties jomis nusileidžia žemiau (12.5.3 pav., *b*). Užpiltas ant kietojo kūno paviršiaus, šis skystis sudaro lašelius (žr. 12.5.1 pav., *b*).
- Kai skystis visiškai drėkina kietąjį kūną, sąlyčio kampas lygus nuliui (θ = 0°). Toks skystis ant horizontalaus kieto paviršiaus niekada nesudaro lašų. Pavyzdžiui, vanduo visiškai drėkina švarų stiklą.
- Kai skystis visiškai nedrėkina kietojo kūno, sąlyčio kampas θ lygus 180°. Ant horizontalaus kieto paviršiaus jo visiškai nedrėkinančio skysčio lašeliai įgyja rutuliuko formą. Pavyzdžiui, gyvsidabris visiškai nedrėkina stiklo.

Drėkinimo taikymas

Į drėkinimo reiškinį atsižvelgiama praktikoje. Geras drėkinimas svarbus dažant paviršius, klijuojant, skalbiant, prausiantis. Jis aktualus ir kosmetikoje, nes įvairūs kremai bei losjonai turi gerai drėkinti veido odą. Drėkinimo reiškiniu pagrįstas naudingųjų iškasenų sodrinimo būdas, vadinamas flotācija (angl. *flo(a)tation* – išplaukimas, iškilimas). Pavyzdžiui, šiuo būdu sodrinamas smėlis. Jis suplakamas su muilo skiediniu. Nereikalingos priemaišos iškyla kartu su putomis, o nuosėdose lieka kvarcinis smėlis.

Nedrėkinimu pagrįsta hidroizoliacinių medžiagų gamyba. Iš tokių medžiagų gaminami skėčiai, siuvami lietpalčiai, striukės. Jos taip pat naudojamos statyboje.

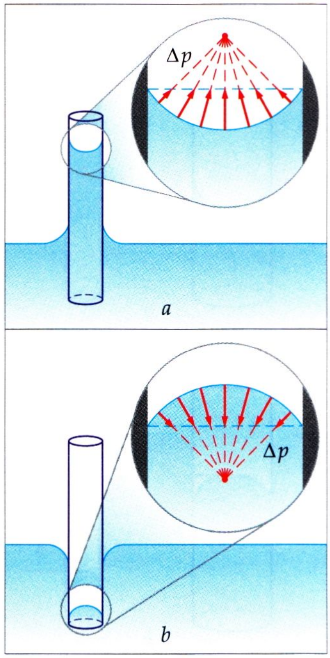
Papildomas slėgis

Drėkinančių arba nedrėkinančių skysčių kreiva menisko forma turi įtakos skysčio paviršiaus slėgiui. Dėl jos atsiranda ***papìldomas slė̃gis*** Δp (12.5.4 pav.). 1806 m. prancūzų mokslininkas Pjeras Laplasas (*Pierre Laplace*) įrodė, kad šio slėgio didumas priklauso nuo skysčio paviršiaus įtempties koeficiento σ ir menisko kreivumo spindulio R:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}. \qquad (12.13)$$

Todėl menisko sukeltas papildomas slėgis dar vadinamas Laplaso slėgiu.

Jo atsiradimas aiškinamas skysčio paviršiaus įtempties jėgomis. Visos šios jėgos, veikiančios liestinių kryptimis, sudaro atstojamąją jėgą, nukreiptą į menisko kreivumo centrą. Kai skystis yra drėkinantis, atstojamoji nukreipta į išorę (12.5.4 pav., *a*), kai nedrėkinantis – į skysčio vidų (12.5.4 pav., *b*). Pirmuoju atveju ji sumažina skysčio paviršiaus slėgį, todėl drėkinantis skystis vamzdelyje pakyla. Antruoju atveju ji padidina skysčio paviršiaus slėgį, priversdama nedrėkinantį skystį vamzdelyje nusileisti žemyn.



12.5.4 pav.

Kapiliariniai reiškiniai

Šie reiškiniai vyksta kapiliãruose (lot. *capillaris* – plaukinis), t. y. vamzdeliuose, kurių vidinis skersmuo yra labai mažas. ***Kapiliãriniai reiškiniaĩ – tai skysčio pakilimas arba nusileidimas kapiliaruose, palyginti su jo lygiu storuose vamzdžiuose.***

Kaip sužinoti, kiek skystis kapiliare pakils arba nusileis? Žinome, kad apskrito paviršiaus sluoksnio riboje vamzdelio sieneles veikia paviršiaus įtempties jėga $\vec{F}'$, nukreipta žemyn. Pagal trečiąjį Niutono dėsnį tokio pat modulio jėga, tačiau priešinga kryptimi vamzdelio sienelės veikia skystį (12.5.5 pav.), todėl

$$F = \sigma \cdot l = \sigma \cdot 2\pi r. \qquad (12.14)$$

Kai šią jėgą atsveria pakilusio skysčio stulpelį veikiantis sunkis, t. y. kai

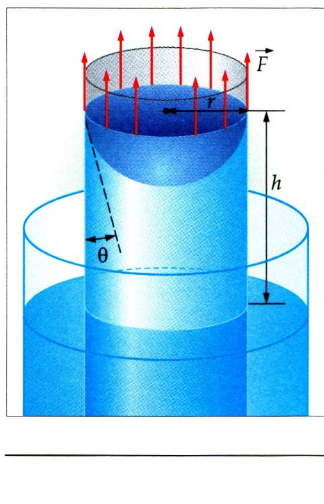
$$F = F_s = mg, \qquad (12.15)$$

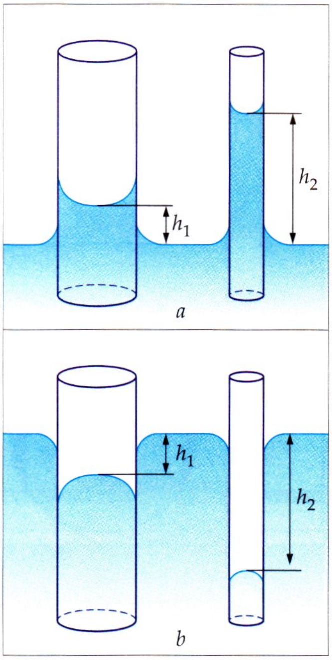
skystis nustoja kilti kapiliaru. Sunkis lygus

$$mg = \rho V g = \rho \pi r^2 h g; \qquad (12.16)$$

čia ρ – skysčio tankis.

12.5.5 pav.





12.5.6 pav.

Į (12.15) lygtį įrašę (12.14) ir (12.16) išraiškas, gauname:

$$2\pi\sigma r = \pi\rho g h r^2. \qquad (12.17)$$

Iš čia išreiškiame drėkinančio skysčio pakilimo aukštį:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}. \qquad (12.18)$$

Iš (12.18) formulės matyti, kad skysčio pakilimo aukštis kapiliare yra tiesiogiai proporcingas skysčio paviršiaus įtempties koeficientui ir atvirkščiai proporcingas skysčio tankiui bei kapiliaro spinduliui. Vadinasi, kuo siauresnis kapiliaras, tuo aukščiau juo pakyla drėkinantis skystis (12.5.6 pav., *a*). Kapiliaro sienelių nedrėkinantis skystis (pavyzdžiui, gyvsidabris stikliniame vamzdelyje) nusileidžia žemiau negu plačiame inde (12.5.6 pav., *b*). Skysčio nusileidimo gylis h nustatomas pagal tą pačią (12.18) formulę.

Kapiliarinius reiškinius kasdien stebime gamtoje, technikoje ir buityje. Po visą žmogaus ir gyvūnų organizmą tankiai išsišakojusiais kapiliarais nuolat cirkuliuoja kraujas ir maisto medžiagos. Dėl kapiliarinių reiškinių vanduo iš dirvožemio per šaknis ir kamieną pakyla į medžių lapus. Pavyzdžiui, taip karštą vasaros dieną beržas pro lapus išgarina apie 6 kibirus vandens.

Drėgmės apykaita dirvožemyje vyksta tik dėl to, kad vanduo pakyla plonyčiais dirvožemio kapiliarais. Dirvą suarus ar suakėjus, tie kapiliarai suardomi ir vanduo į dirvožemio paviršių nepakyla – drėgmė dirvoje išsilaiko ilgiau. Kai drėgmę iš dirvos reikia išgarinti greičiau, dirva voluojama.

Kapiliarų yra ir statybinėse medžiagose: betone, plytose ir t. t. Į tai atsižvelgiama statant namus – kad sienos ir pamatai nedrėktų, jie apsaugomi hidroizoliacinėmis medžiagomis. Kapiliarinė struktūra taip pat būdinga sugeriamajam popieriui, kempinėms, rankšluosčiams ir kitiems buitiniams reikmenims.

Klausimai ir užduotys ??

1. Paaiškinkite drėkinimo reiškinį. Kada skysčiai drėkina kietojo kūno paviršių, o kada jo nedrėkina? Pateikite drėkinimo ir nedrėkinimo pavyzdžių.

2. Paaiškinkite kapiliarinį reiškinį. Kodėl drėkinančių skysčių meniskas yra įgaubtas, o nedrėkinančių – iškilas?

3. Lininiai audiniai yra higieniškesni už sintetinius. Pagrįskite kodėl.

4. Pagal kokią formulę apskaičiuojamas skysčio pakilimo aukštis kapiliare?

5. Kaip skysčio pakilimo aukštis kapiliare priklauso nuo kapiliaro skersmens?

6. Kaip kinta vandens pakilimo dirvos kapiliarais aukštis kylant temperatūrai?

7. Vandens paukščių plunksnos padengtos riebalų sluoksniu. Kokį vaidmenį jis atlieka?

8. Nustatykite, ar gali grunte ištirpusios medžiagos augalų stiebų kapiliarais, kurių skersmuo mažesnis kaip 0,1 mm, pakilti į 5 m aukštį? Tirpalo paviršiaus įtempties koeficientas 0,073 N/m.

9. Skystis pakilo kapiliaru, kurio spindulys $r = 2$ mm. Pakilusio skysčio masė 0,09 g. Apskaičiuokite skysčio paviršiaus įtempties koeficientą. (0,07 N/m)

10. Ant vandens paviršiaus padedamas 4 cm ilgio degtukas. Iš vienos jo pusės vanduo paliečiamas muilo gabalėliu. Degtukas pasislenka į švaraus vandens pusę.

a) Paaiškinkite, kodėl degtukas pasislenka. Aiškinimą iliustruokite brėžiniu.

b) Apskaičiuokite degtuką veikiančią jėgą. (1,3 mN)

12.6. Orai ir jų stebėjimas

Šiame skyriuje nagrinėjome fizikinius dydžius, kurie siejasi su orų prognozėmis. Tai – vandens garų dalinis slėgis, santykinis oro drėgnis, rasos taškas. Susipažinome su oro drėgnio matavimo prietaisais. Dabar plačiau aptarsime meteorologijos raidą ir meteorologinius stebėjimus.

Meteorològija (gr. *meteoron* – atmosferos reiškinys, *logos* – mokslas) – mokslas, tiriantis Žemės atmosferą ir joje vykstančius procesus. Oro sąlygos žmonėms visada buvo labai svarbios. Jie norėjo žinoti, kokie orai bus netrukus, taip pat ateityje.

Jau apie 433 m. pr. Kr. graikai naudojo orų kalendorius – parapegmas. Juose būdavo aprašyti skirtingais metais įvykę neįprasti gamtos reiškiniai (dideli

vėjai, krituliai, šalčiai, rūkas). Šie kalendoriai naudoti kaip prognozės būsimiems metams. Panašūs kalendoriai buvo ir senovės Ròmoje. Orų kalendoriai ypač išpopuliarėjo viduramžiais. Deja, reikia pastebėti, kad dauguma šių kalendorių rėmėsi tik jų autorių fantazija ir išmone, o ne realiais faktais.

Mokslinį pagrindimą atmosferos stebėjimai įgavo tik XVII a., kai atsirado orui prognozuoti naudojami prietaisai (pavyzdžiui, termometras ir barometras). 1721 m. Didžiõjoje Britãnijoje pradėti vykdyti sistemingi meteorologiniai stebėjimai. XVIII a. viduryje atsirado atmosferos elektrinių reiškinių teorija, kurios pradininku galime laikyti rusų mokslininką Michailą Lomonosovą.

XIX a. susikūrė pirmosios globalios meteorologinės asociacijos. 1873 m. Šveicãrijoje įsteigta Tarptautinė meteorologijos organizacija. 1950 m. kovo 23 d. įsigaliojo Pasaulinė meteorologijos organizacijos konvencija, patvirtinta JTO (Jungtinių Tautų Organizacijos). 1961 m. pradėta minėti Pasaulinė meteorologijos diena (kovo 23-ioji).

Lietuvojè meteorologijos mokslo įžvalgų galima aptikti etninėje kultūroje. Kaip ir daugelio kitų šalių gyventojai, mūsų protėviai taip pat bandė spėti orus. Jų sprendimus lemdavo įvairūs gamtos reiškiniai. Buvo stebima, kaip juda dangaus kūnai (Saulė, Mėnulis), kaip elgiasi naminiai ir laukiniai gyvūnai, paukščiai. Pavyzdžiui, žiemą žmonės sakydavę: jei varnos ir kuosos krankia dažnai – snigs, pustys. Atėjus pavasariui, buvo kalbama: jei paukščiai lekia žemai, galima tikėtis šalčių, jei aukštai – šilumos. O vasarą, saulei leidžiantis į debesis, žmonės manydavę, kad rytoj bus prastas oras. Rudenį, išvydę ant ražienų besidraikančius voratinklius, laukdavo ilgo ir gražaus rudens. Daugelis mūsų protėvių spėjimų išliko iki šiol.

Pirmieji meteorologiniai stebėjimai Lietuvojè sietini su Vìlniaus universiteto observatorijos įkūrimu 1770 m., o vandens lygio stebėjimai pradėti 1810–1811 m. Rùsnėje, Smaliniñkuose, Tilžėje, Sieliuosè. 1869–1897 m. Lietuvojè buvo pradėtos steigti pirmosios meteorologijos stotys. 1921 m. Kaunè įkurta Centrinė meteorologijos stotis, o 1938 m. įsteigtas Klimatologijos institutas. Dabar didžiausius meteorologinius tyrimus Lietuvojè atlieka Lietuvõs hidrometeorologijos tarnyba.

12.6.1 pav.

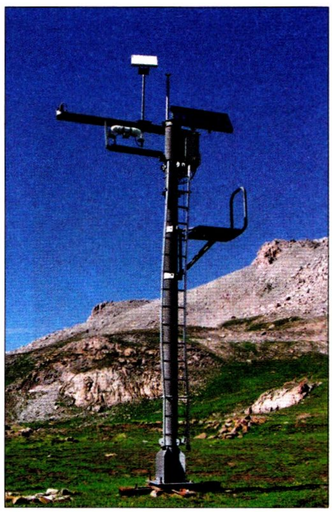
Meteorologinių stebėjimų duomenimis, per pastarąjį šimtmetį oro temperatūra Lietuvojè pakilo 0,9 °C. Orų šiltėjimas mūsų šalyje susijęs su visuotiniu klimato kitimu. Būtent klimato pokyčiai lemia, jog vis dažniau tenka stebėti stichinius gamtos reiškinius, neįprastus meteorologinių parametrų rekordus.

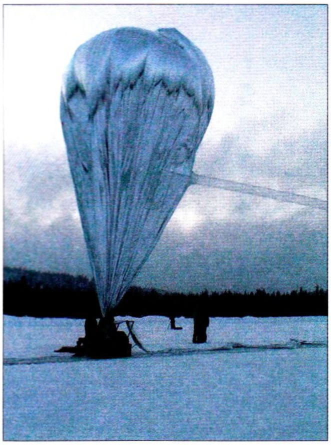
Antra vertus, klimato ekstremumai Lietuvojè buvo fiksuojami ne tik pastaraisiais metais. Žemiausia temperatūra (–42,9 °C) užfiksuota 1956 m. Utenojè, o aukščiausia (37,5 °C) – 1994 m. Zarasuosè. Stipriausias vėjas Lietuvojè praūžė 1999 m., siautėjant uraganui „Anatolijus". Jo greitis siekė 44 m/s. Gamtai buvo padaryta daug žalos (12.6.1 pav.). Didžiausią liūtį 1980 m. liepos 1 d. mena Sartų̃ ežero apylinkių gyventojai, kai per 8 valandas iškrito 250 mm kritulių. Storiausia kada nors Žemės paviršių apklojusi sniego danga mūsų šalies teritorijoje siekė 90 cm (Laũkuvoje), o giliausias dirvožemio įšalas stebėtas 1969 m. ir siekė 145 cm. Mažiausias santykinis oro drėgnis (14 %) buvo užregistruotas 1995 m. Šilùtėje.

Meteorologai fiksuoja oro temperatūrą, drėgnį, slėgį, vėjo kryptį ir jo stiprumą, taip pat kritulių formą ir kiekį, matomumą bei debesuotumą. Tam naudojami įvairūs prietaisai. Meteorologijos stotyje (12.6.2 pav.) naudojami šie pagrindiniai prietaisai:

- termometrai, matuojantys dirvožemio temperatūrą;
- anemometrai, teodolitai ir vėjarodžiai, fiksuojantys vėjo greitį ir kryptį;

12.6.2 pav.





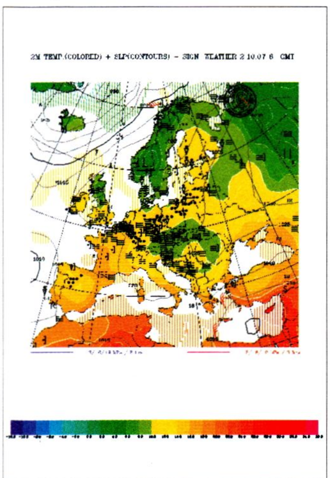
12.6.3 pav.

- barografai ir barometrai, registruojantys atmosferos slėgį;
- kritulmačiai, naudojami kritulių kiekiui matuoti.

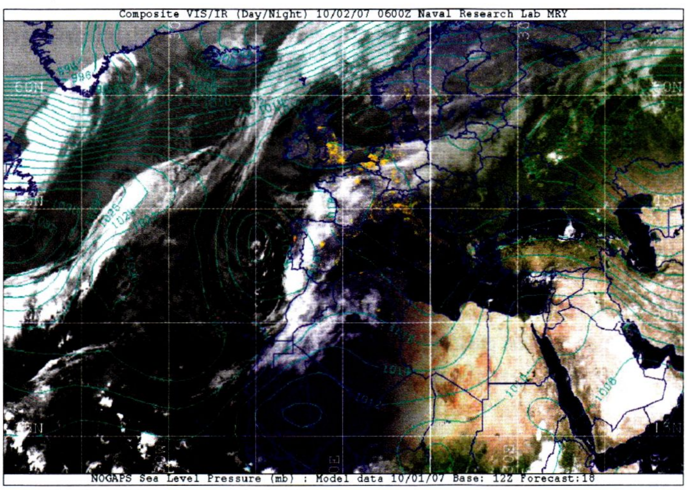
Meteorologijos stotyse naudojami radijo zondai (12.6.3 pav.). Jais 30–40 km aukštyje matuojama oro temperatūra, vėjo greitis ir slėgis. Remiantis gautais duomenimis, sudaromi sinoptiniai žemėlapiai (12.6.4 pav., *a*, *b*), kuriuose vaizduojamas ciklonų (mažo atmosferos slėgio sūkurių), anticiklonų (didelio atmosferos slėgio sūkurių), oro srautų ir atmosferos frontų judėjimas, nurodoma temperatūra ir slėgis. Be to, sinoptiniuose žemėlapiuose nubrėžiamos izobaros – linijos, jungiančios vienodo slėgio taškus. Remiantis tokiais žemėlapiais, debesų nuotraukomis ir palydovine informacija (12.6.5 pav.), numatomi būsimi atmosferos procesų pokyčiai.

Šiandien neįsivaizduojame televizijos žinių, laikraščių ar interneto puslapių be rytdienos orų prognozės. Meteorologiniai duomenys aktualūs aviacijoje, laivyboje, žemės ūkyje ir daugelyje kitų sričių. Pavyzdžiui, pilotams svarbūs atmosferos reiškiniai, bloginantys matomumą (rūkas, krituliai), atmosferos frontai, debesuotumas, meteorologinės sąlygos, galinčios sukelti orlaivių apledėjimą. Žemės ūkyje ypač svarbi temperatūra dirvos paviršiuje ir 1,5–2 m aukštyje. O štai vėjo parametrai rūpi vėjo elektrinių statybos planuotojams, todėl jiems aktuali informacija apie vėjo energijos potencialą įvairiose vietovėse.

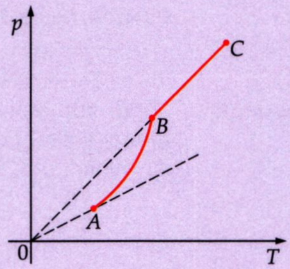
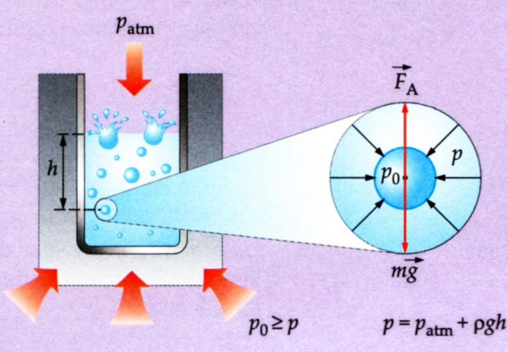
12.6.4 pav.

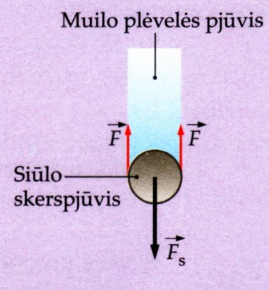


12.6.5 pav.

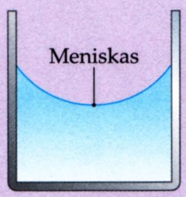


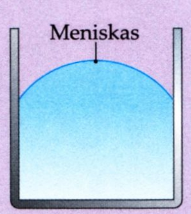
Skyriaus „Garai ir skysčiai“ apibendrinimas

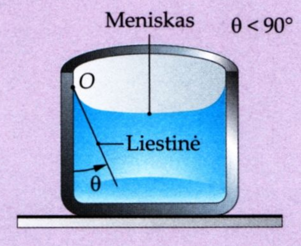
Sotieji garai	Garai, esantys su skysčiu dinaminėje pusiausvyroje, vadinami sočiaisiais.
Sočiųjų garų slėgis	Didžiausias garų, esančių su skysčiu dinaminėje pusiausvyroje, slėgis vadinamas sočiųjų garų slėgiu (p_0).
Sočiųjų garų slėgio savybės	1. Sočiųjų garų slėgis nepriklauso nuo tūrio. 2. Kylant temperatūrai, sočiųjų garų slėgis didėja sparčiau negu idealiųjų dujų. 
Virimas	Virimas – procesas, kurio metu skystis garuoja ne tik iš paviršiaus, bet ir iš vidaus.
Pagrindinė skysčio virimo sąlyga	Skystis pradeda virti tokioje temperatūroje, kurioje jo sočiųjų garų slėgis burbuliukuose yra ne mažesnis už išorinį slėgį: $p_0 \geq p_{atm} + \rho g h.$ 

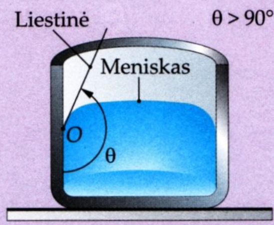
Kritinė temperatūra	Temperatūra, kuriai esant išnyksta skirtumas tarp skysčio ir jo sočiųjų garų fizinių savybių, vadinama kritine.
Oro drėgnis	Vandens garų kiekis ore vadinamas oro drėgniu.
Vandens garų dalinis slėgis	Vandens garų slėgis, kai nepaisoma visų kitų dujų, vadinamas vandens garų daliniu slėgiu.
Santykinis oro drėgnis	Santykiniu oro drėgniu φ vadinamas ore esančių vandens garų dalinio slėgio p ir oro temperatūros sočiųjų vandens garų slėgio p_0 santykis, išreikštas procentais: $$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%.$$
Rasos taškas	Temperatūra t_r, kurioje vandens garai virsta sočiaisiais, vadinama rasos tašku.
Paviršiaus įtempties jėga	Jėga, kuri veikia skysčio paviršiaus liestinės kryptimi statmenai linijai, ribojančiai tą paviršių, ir stengiasi sumažinti jį iki minimumo, vadinama paviršiaus įtempties jėga. 
Skysčio paviršiaus įtempties koeficientas	Paviršiaus įtempties jėgos $\vec{F}$, kuri veikia ilgio l paviršiaus kontūrą, modulio ir to ilgio santykis vadinamas skysčio paviršiaus įtempties koeficientu: $$\sigma = \frac{F}{l};$$ $$[\sigma] = 1\,\frac{\text{N}}{\text{m}}.$$
Drėkinimas	Drėkinimas yra skysčio laisvojo paviršiaus išlinkimas prie kietojo kūno paviršiaus dėl skysčio ir kietojo kūno molekulių sąveikos.

<table>
<tr><td>Meniskas</td><td>Lenktas skysčio paviršius vadinamas menisku.

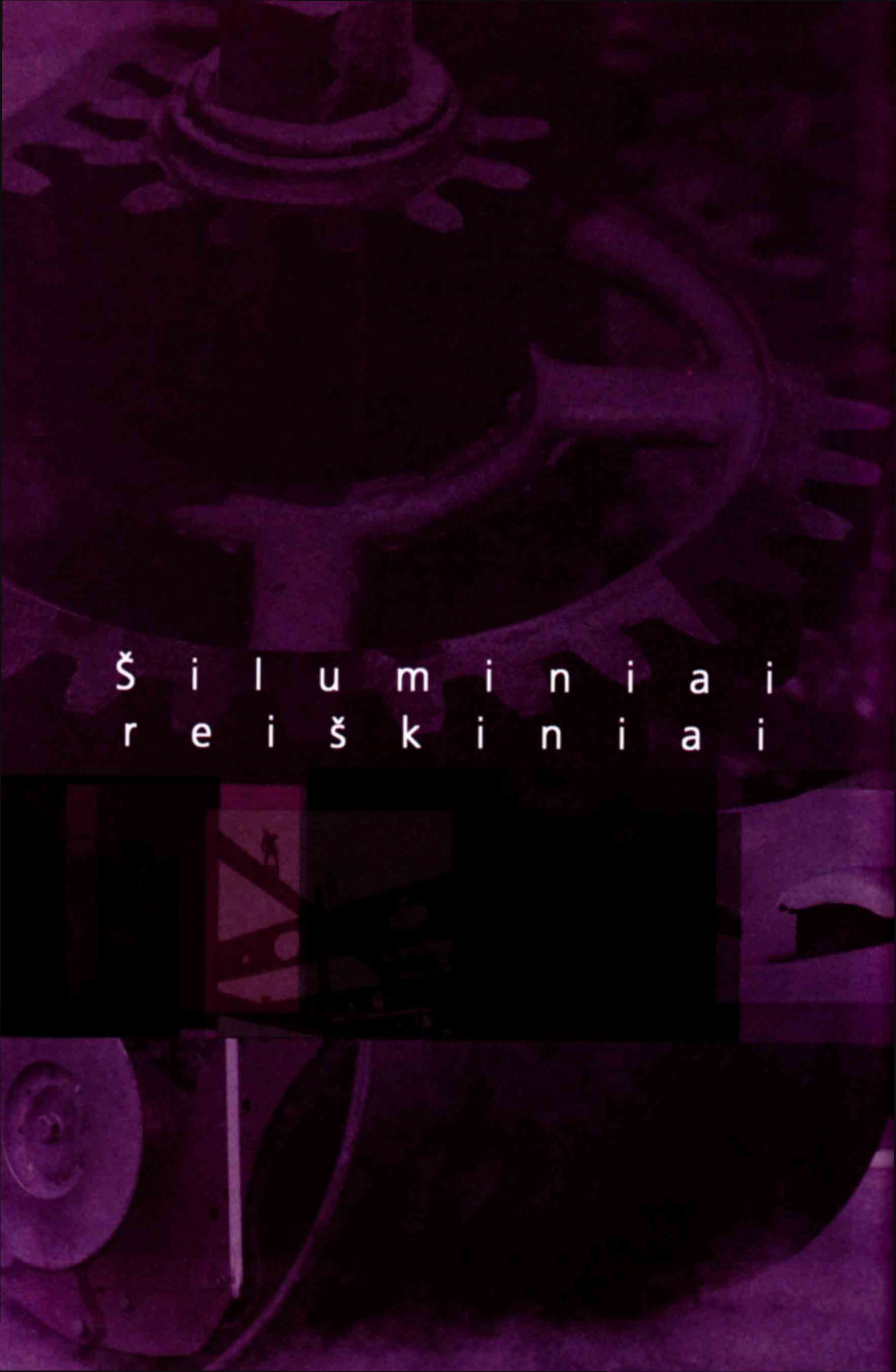
• Kai skystis drėkina indo sieneles, meniskas yra įgaubtas.


• Kai skystis nedrėkina indo sienelių, meniskas yra iškilas.

</td></tr>
<tr><td>Sąlyčio kampas</td><td>Sąlyčio kampas – tai kampas tarp kietojo kūno paviršiaus ir skysčio paviršiaus liestinės, išvestos per lietimosi tašką O.

• Kai skystis drėkina indo sieneles, sąlyčio kampas yra smailusis ($\theta < 90°$).


• Kai skystis nedrėkina indo sienelių, sąlyčio kampas yra bukasis ($\theta > 90°$).

</td></tr>
<tr><td>Kapiliariniai reiškiniai</td><td>Kapiliariniai reiškiniai – tai skysčio pakilimas arba nusileidimas kapiliaruose, palyginti su jo lygiu storuose vamzdžiuose.</td></tr>
<tr><td>Skysčio stulpelio pakilimo aukštis</td><td>Skysčio stulpelio pakilimo aukštis kapiliare yra tiesiogiai proporcingas skysčio paviršiaus įtempties koeficientui ir atvirkščiai proporcingas skysčio tankiui bei kapiliaro spinduliui:
$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$</td></tr>
</table>

Šiluminiai reiškiniai



13 Kietieji kūnai

Šiame skyriuje detaliau gvildensite kietųjų kūnų sandarą, susipažinsite su kristaliniais ir amorfiniais kūnais, sužinosite, kas yra anizotropija ir izotropija; aptarsite kietųjų kūnų deformacijų rūšis: tampriąsias ir plastines, taip pat tempimo, šlijimo, sąsūkos ir lenkimo. Nagrinėdami kietųjų kūnų mechanines savybes, susipažinsite su naujais fizikiniais dydžiais: mechaniniu įtempiu, tamprumo moduliu, proporcingumo, tamprumo ir stiprumo ribomis.

13.1. Kietųjų kūnų sandara. Kristaliniai ir amorfiniai kūnai

Pagrindinės sąvokos

Kietíeji kū́nai,
kristalìnė gardẽlė,
kristalìniai kū́nai,
monokristãlas,
polikristãlas,
amòrfiniai kū́nai,
izotròpija,
anizotròpija.

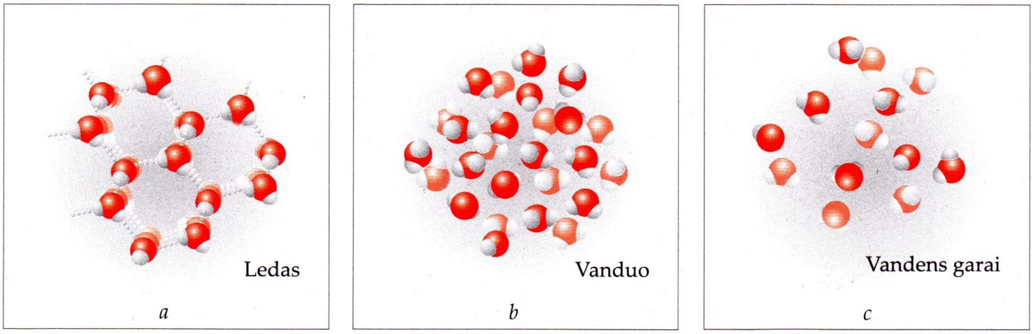
Medžiagos būsenos

Pagal molekulinę kinetinę teoriją kiekvienas kūnas yra sudarytas iš molekulių, kurios netvarkingai juda ir tarpusavyje sąveikauja. Medžiagos būsena priklauso nuo molekulių išsidėstymo, judėjimo ir sąveikos pobūdžio, kurį lemia aplinkos sąlygos (slėgis ir temperatūra). 13.1.1 paveiksle pavaizduota, kaip išsidėsčiusios ledo, vandens ir vandens garų molekulės.

Su keturiomis medžiagos būsenomis: kietąja, skystąja, dujine ir plazma – susipažinote mokydamiesi fizikos žemesnėse klasėse. Žinote, kad ta pati medžiaga gali būti kieta, skysta ir dujinė, o tam tikromis sąlygomis virsti plazma. Mus supančioje aplinkoje matome tris vandens būsenas: kietąją – ledą, skystąją – vandenį, dujinę – vandens garus. Tačiau sunku įsivaizduoti, kad tokias būsenas gali įgyti bet kuri medžiaga. Pavyzdžiui, neįsivaizduojame skysto, o juo labiau kieto deguonies.

Pirmieji bandymai suskystinti dujas atlikti XIX a. 1823 m. Maiklas Faradėjus (*Michael Faraday*), kurio elektros darbus jau žinote, suskystino chlorą, vėliau – anglies dioksidą ir vandenilio sulfidą. Skystinamas dujas Faradėjus slėgė ir šaldė. Deguonies suskystinti jam nepavyko. Tai tik 1877 m. padarė prancūzų kalnų inžinierius Lui Kaljetė (*Louis Cailletet*). Kiek vėliau

13.1.1 pav.



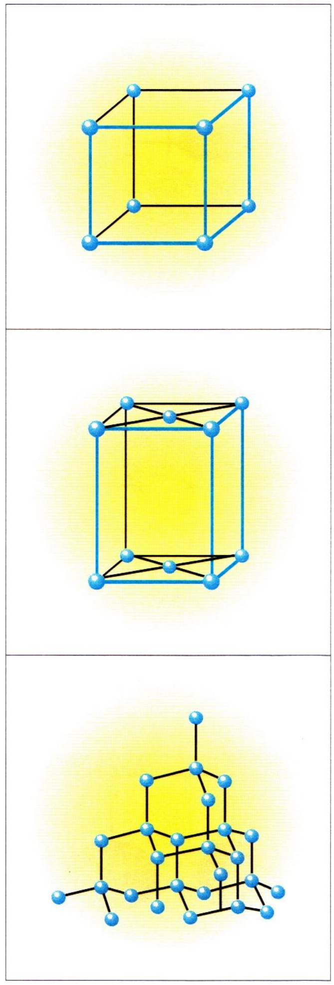
buvo suskystintos kitos dujos: 1898 m. – vandenilis, 1908 m. – helis.

Suskystintos dujos labai greitai garuoja. Šis reiškinys turi praktinę reikšmę, nes suskystintą orą galima išskaidyti į sudedamąsias dalis. Pirmiausia išgaruoja tos jo dalys, kurių virimo temperatūra žemesnė: neonas, azotas, argonas, deguonis. Gautos dujos taikomos technikoje, pavyzdžiui, deguonis, sumaišytas su acetilenu (arba vandeniliu), naudojamas metalams virinti bei pjaustyti, azotas – amoniakui gauti, argono ir neono pripildomos elektros lempos.

Kai kurie kūnai, atšaldyti skystose dujose, pasidaro trapūs kaip stiklas. Antai gabalas gumos, atšaldytas suskystintame ore (–190 °C), lengvai lūžta, guminis sviedinukas nuo smūgio subyra į gabaliukus.

Žemėje dujos skystinamos specialia įranga, o kitose planetose jos egzistuoja natūraliai. Per astronomijos pamokas sužinojote, kad didžiųjų Saulės sistemos planetų (Jupiterio, Saturno, Urano) paviršius padengtas skystu molekuliniu vandeniliu bei heliu. Urano atmosferoje plaukioja sušalę metano ir amoniako debesys. Šie faktai patvirtina, kad ta pati medžiaga tam tikromis sąlygomis gali būti skirtingų būsenų. Žemėje vandenilis ir metanas yra dujiniai. Urano paviršiuje vandenilis – skystas, o atmosferoje metanas – kietas. Iš trijų medžiagos būsenų jau aptartos dvi: dujinė ir skystoji. Dabar nagrinėsime kietąją būseną.

13.1.2 pav.



Kietieji kūnai

Žemės sąlygomis dauguma medžiagų yra kietosios būsenos. Kiekviena kietojo kūno molekulė užima tam tikrą erdvės dalį. Molekulės čia išsidėsto taip, kad jų traukos jėgos kompensuoja stūmos jėgas. Taigi kiekviena molekulė neleidžia kitoms užimti tos padėties, kurioje yra pati. Dėl to kietojo kūno molekulės erdvėje išsidėsto tankiai ir tvarkingai. Laisvai judėti jos negali, todėl tik svyruoja apie pusiausvyros padėtį. Dėl šios priežasties kietieji kūnai išlaiko ne tik tūrį, bet ir formą.

Sujungus kietojo kūno molekulių (atomų arba jonų) pusiausvyros centrus, gaunama taisyklinga erdvinė gardelė, kuri vadinama ***kristalinė gardelė*** (gr. *krystallos* – ledas, krištolas). Ji gali būti įvairių formų (13.1.2 pav.). Kubinę gardelę turi valgomoji druska,

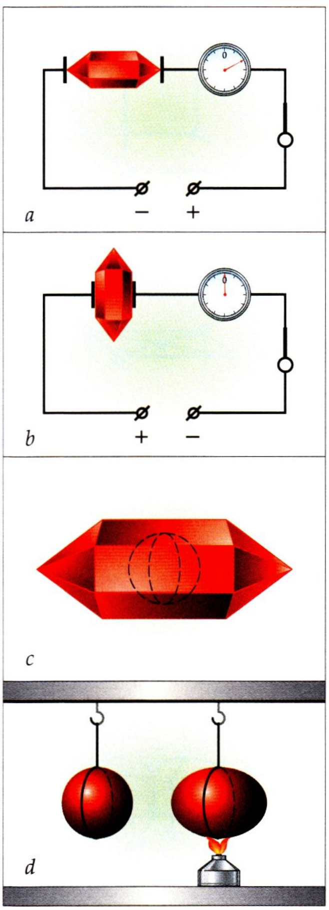
piritas, rombinę – kvarcas, topazas. Joninės erdvinės gardelės mazguose dažnai būna teigiamieji arba neigiamieji jonai, kitais atvejais – atomai.

Kristaliniai kūnai

Kietieji kūnai, kurių molekulės (atomai arba jonai) erdvėje išsidėstę tvarkingai, vadinami kristalìniais kū́nais, arba kristãlais. Prie jų priskiriami įvairūs metalai, valgomoji druska, vario sulfatas, alūnas, kvarcas, deimantas, grafitas ir pan. Kietasis kūnas, sudarytas iš vieno kristalo, vadinamas ***monokristalù*** (gr. *monos* – vienas, vienintelis, vientisas).

Monokristalų fizinės savybės priklauso nuo pasirinktos krypties kristale. Daugelis kristalų šviesą, šilumą ir elektros srovę įvairiomis kryptimis praleidžia skirtingai (13.1.3 pav., *a* ir *b*). Nuo krypties priklauso ir šiluminis kristalų plėtimasis (13.1.3 pav., *c* ir *d*) bei mechaninis atsparumas. Pavyzdžiui, grafito kristalas lengvai skyla viena kryptimi. Dėl to, rašant pieštuku, nuo jo nepaliaujamai atsiskiria ploni grafito sluoksniai ir pasilieka ant popieriaus. ***Kristalo fizinių savybių priklausomybė nuo krypties kristalo viduje vadinama anizotròpija*** (gr. *anisos* – nelygus, *tropos* – kryptis, savybė). Kristalams ji būdinga dėl to, kad tvarkingai išsidėsčiusių atomų, molekulių arba jonų sąveikos jėgos ir atstumai tarp atomų skirtingomis kryptimis yra nevienodi (13.1.2 pav.). Kristalai šiuo metu plačiai naudojami puslaidininkinėje elektronikoje, lazerių gamyboje, užrašant ir atgaminant garsą ir kitose srityse.

13.1.3 pav.

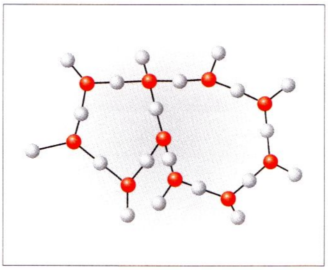


Kietasis kūnas, sudarytas iš daugybės vienas su kitu suaugusių mažų kristalėlių, vadinamas ***polikristalù*** (gr. *polys* – didelis, gausus). Pavyzdžiui, grūdinto plieno, ketaus lūžio vietoje net plika akimi galima įžiūrėti smulkius kristalėlius. Iš polikristalų pagamintų daiktų nesunku rasti mus supančioje aplinkoje. Tai – metaliniai šaukštai, šakutės, peiliai ir kt. Rafinuotas cukrus taip pat yra polikristalas.

Dėl netvarkingo kristalėlių išsidėstymo fizinės polikristalų, taigi ir metalų, savybės visomis kryptimis yra vienodos. Kietojo kūno fizinių savybių nepriklausymas nuo pasirinktos krypties jo viduje vadinamas ***izotròpija***. Taigi polikristalinės medžiagos yra izotropiškos.

Amorfiniai kūnai

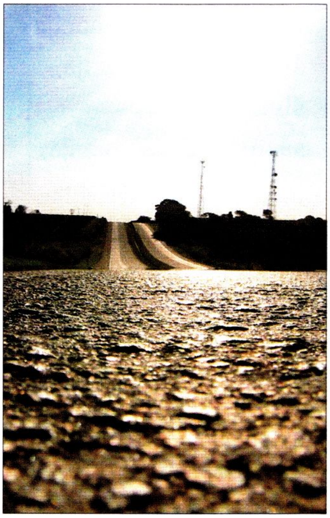
Izotropiškumas būdingas dar vienai kietųjų kūnų grupei, vadinamai ***amòrfiniais kū́nais***. Prie amorfinių medžiagų priskiriamas stiklas, gintaras, derva, daugelis plastikų. Amorfinių kūnų tik artimiausi atomai išsidėsto beveik tvarkingai (artimoji tvarka). Šiuose kūnuose to paties elemento sandara visomis kryptimis tiksliai nesikartoja kaip kristaluose. Amorfinių kūnų fizinių savybių izotropiškumas aiškinamas tų kūnų atomų ar molekulių netvarkingu išsidėstymu (13.1.4 pav.).



13.1.4 pav.

Tam tikromis sąlygomis amorfiniai kūnai būna tamprūs kaip kietieji kūnai ir takūs kaip skysčiai. Pavyzdžiui, esant žemai temperatūrai, dervos gabalas yra kietas ir, stipriai smogtas plaktuku, subyra. Karštą vasaros dieną pabuvęs saulės atokaitoje, jis pradeda minkštėti ir pasidaro klampus kaip skystis (13.1.5 pav.). Taigi temperatūrai kylant, amorfiniai kūnai pamažu minkštėja, pasidaro takūs. Jų savybės vis labiau primena skysčių savybes. Tai galima pagrįsti amorfinių kūnų sandara. Jų atomai arba molekulės, panašiai kaip skysčio molekulės, tam tikrą laiką svyruoja apie pusiausvyros padėtį, o paskui peršoka į naują. Tačiau tokie jų šuoliai yra gerokai retesni negu skysčių molekulių. Todėl žemoje temperatūroje amorfiniai kūnai artimesni kristaliniams. Temperatūrai kylant, molekulių šuoliai iš vienos sėslios padėties į kitą padažnėja – kūnai minkštėja, pasidaro takūs, taigi ir artimesni skysčiams. Tam tikros lydymosi temperatūros amorfiniai kūnai, kaip kristaliniai, neturi.

13.1.5 pav.



Klausimai ir užduotys ???

1. Apibūdinkite dalelių (atomų, molekulių arba jonų) sąveikos jėgas ir judėjimo pobūdį kietuosiuose kūnuose, skysčiuose ir dujose.

2. Kuo panaši ir kuo skiriasi kristalinių ir amorfinių kūnų sandara?

3. Paaiškinkite izotropijos reiškinį. Kam jis būdingas?

4. Ar visi kristaliniai kūnai yra anizotropiniai? Atsakymą pagrįskite.

5. Mediena yra anizotropinė. Ar ją galima laikyti kristaline medžiaga?

13.2. Kietųjų kūnų deformacijos rūšys

Pagrindinės sąvokos

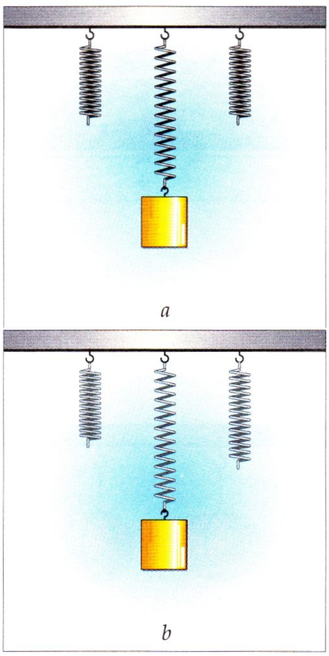
Tampriòji deformãcija, plãstinė deformãcija, absoliutùsis pailgė́jimas, santykìnis pailgė́jimas, tempìmo deformãcija, šlijìmo deformãcija, šlytiẽs kam̃pas, są́sūkos deformãcija, lenkìmo deformãcija.

Tamprioji ir plastinė deformacija

Mus supančius kietuosius kūnus veikia įvairios išorinės jėgos, pavyzdžiui, namo pamatus – sienų svoris, tiltą – juo važiuojančių automobilių svoris, obels šakelę – obuolio svoris, jūros tilto turėklus – vėjo jėga. Kai išorinių jėgų poveikis nedidelis, kietieji kūnai išlaiko formą. Tačiau, veikiant stipresnėms jėgoms, kūnų forma pasikeičia, t. y. kūnai deformuojasi. Deformacijos sąvoka jums nėra nauja. Ji jau buvo minėta nagrinėjant tamprumo jėgą. Primename: kūno formos arba tūrio pasikeitimas vadinamas deformãcija. Aptarsime įvairias deformacijos rūšis ir jų klasifikaciją. Pagal tai, ar deformuojami kūnai grįžta į pradinę būseną, deformacija skirstoma į tam̃priąją ir plãstinę.

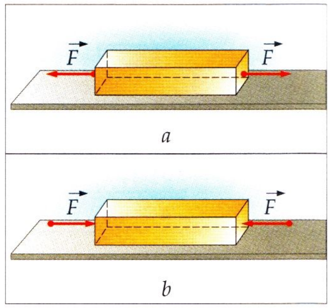
Deformacijos rūšims aptarti pasirinkime kūnus, kurie lengvai deformuojasi. Ištempkime guminę juostelę, traukdami ją už galų. Juostelės dalys pasislinks viena kitos atžvilgiu. Juostelė pailgės ir suplonės, taigi deformuosis. Deformacija atsiranda visada, kai atskiros kūno dalys nevienodai pasislenka viena kitos atžvilgiu. Paleista juostelė grįžta į pradinę būseną. Deformacija, kuri visiškai išnyksta nustojus veikti išorinėms jėgoms, vadinama ***tampriąja***. Ją patiria tamprios spyruoklės (13.2.1 pav., *a*), susiduriantys plieniniai rutuliukai, negūsingame vėjyje siūbuojantys javai bei medžiai ir t. t.

13.2.1 pav.



Tačiau kartais, nustojus veikti išorinėms jėgoms, deformuojamų kūnų forma neatsistato. Pavyzdžiui, minkomas plastilino gabaliukas lengvai keičia formą, tačiau nustotas minkyti pirmykštės formos savaime neatgauna. Deformacija, kuri neišnyksta nustojus veikti išorinėms jėgoms, vadinama ***plãstine***. Kai apkrova nedidelė, tačiau netrumpalaikė, plastinę deformaciją patiria molis, plastilinas, vaškas, aliumininė spyruoklė (13.2.1 pav., *b*), kramtomoji guma ir kt.

Tempimo ir gniuždymo deformacija

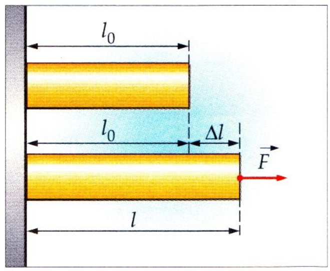


13.2.2 pav.

Pagal jėgos veikimo pobūdį deformacija skirstoma į tempimo (gniuždymo), šlijimo, lenkimo ir sąsūkos. Pirmiausia aptarkime tempimo deformaciją. Ji reiškiasi tada, kai jėgos veikia kūną viena tiese priešingomis kryptimis į išorę (13.2.2 pav., *a*).

Remkimės pavyzdžiu. Sakykime, vienas strypo galas yra įtvirtintas, o kitas tempiamas jėga $\vec{F}$, nukreipta nuo strypo išilgai jo ašies (13.2.3 pav.). Tempimo deformaciją apibūdina fizikinis dydis, vadinamas ***absoliučiúoju pailgė́jimu***. Jis lygus deformuojamo strypo galinio ilgio l ir pradinio ilgio l_0 skirtumui:

$$\Delta l = l - l_0. \tag{13.1}$$



13.2.3 pav.

Absoliutusis pailgėjimas SI sistemoje matuojamas metrais.

Šią deformaciją galima apibūdinti ir kitu fizikiniu dydžiu – ***santykiniù pailgė́jimu***. Jis lygus kūno absoliučiojo pailgėjimo Δl ir pradinio ilgio l_0 santykiui:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \tag{13.2}$$

Kadangi santykinis pailgėjimas išreiškiamas dviejų ilgių santykiu, tai jis matavimo vieneto neturi.

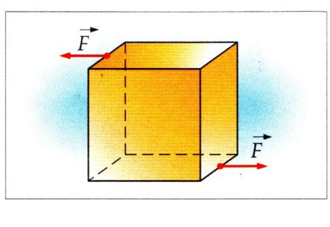
Tempimo deformaciją patiria liftų lynai, keliamųjų įrenginių grandinės, sąvarža tarp krovininio automobilių kėbulo ir priekabos, žmogaus sausgyslės ir raumenys, smuiko ar gitaros stygos ir t. t.

Kai jėgos veikia kūną viena tiese priešpriešiais į vidų, kūnas yra gniuždomas (13.2.2 pav., *b*). Tokio kūno santykinis pailgėjimas yra neigiamas: $\varepsilon < 0$. Gniuždymo deformaciją patiria pastatų pamatai, sienos, stulpai, medžių kamienai, kaulai ir t. t.

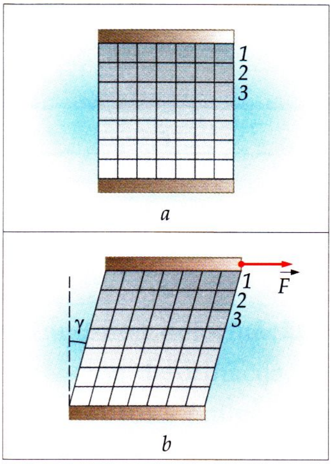
Tempiamo arba gniuždomo kūno kinta ne tik ilgis, bet ir skerspjūvio plotas: tempiamo – mažėja, gniuždomo – didėja.

Šlijimo deformacija

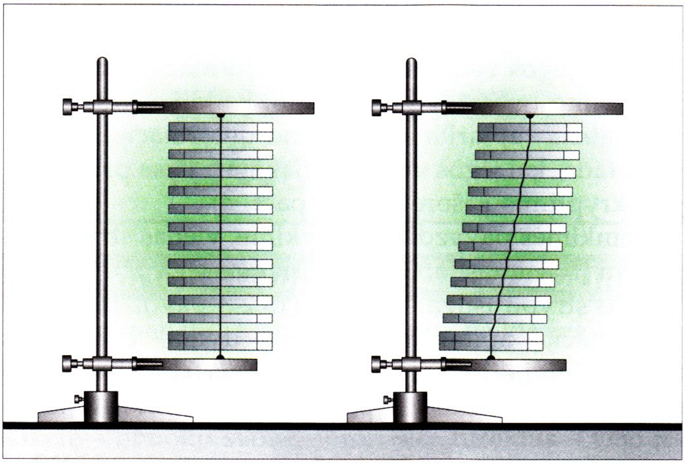
13.2.4 pav.



Deformacija, kurios metu kūno sluoksniai pasislenka lygiagrečiai vieni kitų atžvilgiu, vadinama ***šlijìmo defor̃macija***. Ją kūnai patiria tada, kai išorinės jėgos juos veikia priešpriešiais išilgai lygiagrečių plokštumų (13.2.4 pav.). Tada lygiagrečios kūno dalys slysta

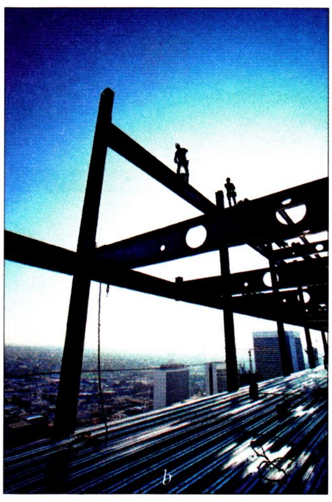


13.2.5 pav.



13.2.6 pav.

13.2.7 pav.



viena kitos atžvilgiu. Tuo nesunku įsitikinti atliekant nesudėtingą bandymą. Ant guminio tašelio išbraižomos vertikalios ir horizontalios tiesės ir viena tašelio siena pritvirtinama prie stalo (13.2.5 pav., *a*). Tašelio viršuje pritaisoma medinė juostelė. Tempiant ją horizontalia jėga $\vec{F}$, tašelio *1*, *2*, *3* ir t. t. sluoksniai pasislenka vieni kitų atžvilgiu (13.2.5 pav., *b*), likdami lygiagretūs, o vertikalios sienos pakrypsta kampu γ, kuris vadinamas ***šlytiẽs kampù***. Būtent šis kampas apibūdina šlijimo deformaciją.

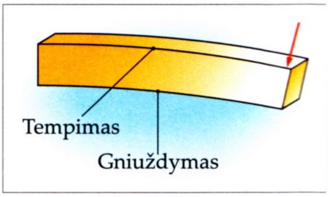
Jėgai $\vec{F}$ padidėjus, padidėja ir šlyties kampas γ. Bandymai rodo, kad tampriai deformuojamo kūno šlyties kampas γ yra tiesiogiai proporcingas veikiančios jėgos $\vec{F}$ moduliui.

Fizikos kabinete šlijimo deformaciją galima pademonstruoti kietojo kūno modeliu (13.2.6 pav.). Jį sudaro daugybė lygiagrečiai viena su kita spyruoklėmis sujungtų plokštelių. Kūno briaunas veikiant horizontalia jėga, plokštelės pasislenka viena kitos atžvilgiu. Šis bandymas atskleidžia dar vieną šlijimo deformacijos ypatybę – deformuojamo kūno tūris nepakinta.

Šlijimo deformaciją patiria uolienos, ledynai kalnų šlaituose, detales jungiantys varžtai, kniedės, judantys kūnai, kuriuos veikia didelė trintis. Kai šlyties kampas labai padidėja, deformuojamas kūnas gali suirti – lūžti. Šis reiškinys stebimas dirbant žirklėmis, kaltu, kirstuku, pjūklu.

Lenkimas ir sąsūka

Sudėtingesnės yra ***lenkìmo*** ir ***sąsūkos deformãcijos***. Lenkimo deformaciją patiria vėjuotą dieną medžiai, stulpai, žmonės. Ji taip pat veikia statinių konstrukcijas: perdangas, storu sniego sluoksniu apklotus pastatų stogus (13.2.7 pav., *a*, *b*). Lenkimo deformaciją sudaro vienų kūno dalių tempimas, o kitų gniuždymas. 13.2.8 paveiksle pavaizduotos sijos viršutinė dalis tempiama, apatinė – gniuždoma.



13.2.8 pav.

Sąsūkos deformacija atsiranda įsukant varžtus (13.2.9 pav.), sukant mašinų velenus, grąžtus ir t. t. Ji reiškiasi kaip nevienalytis tempimas arba gniuždymas ir nevienalytė šlytis. Sukamo kūno atskiri sluoksniai lieka lygiagretūs, tačiau pasisuka vienas kito atžvilgiu tam tikru kampu γ (13.2.10 pav.).

13.2.9 pav.

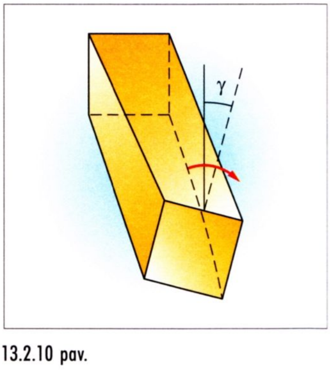
Kietųjų kūnų deformacijos matuojamos prietaisais, kurie vadinami tenzomètrais.

Klausimai ir užduotys

1. Pateikite tampriosios ir plastinės deformacijos pavyzdžių, nepaminėtų tekste.

2. Pateikite tempimo ir šlijimo deformacijos pavyzdžių.

3. Mažeikiškis fizikos mokytojas Arvydas pagavo didelę lydeką (13.2.11 pav.). Įvardykite, kokias deformacijas patiria nufotografuoti kūnai.



13.2.10 pav.

13.2.11 pav.

13.3. Kietųjų kūnų mechaninės savybės

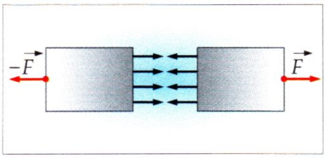
Pagrindinės sąvokos

Mechãninis į̃tempis, tempìmo diagramà, tamprùmo mòdulis, proporcingùmo ribà, tamprùmo ribà, mẽdžiagos takùmas, stiprùmo ribà.

Mechaninis įtempis

Statant tiltus, namus ir kitus statinius, svarbu žinoti pagrindinių statybinių medžiagų (betono, plytų, blokelių) savybes, jų atsparumą mechaninėms deformacijoms. Šiuo požiūriu medžiagų savybės svarbios ne tik statybos inžinieriams, bet ir įvairių įrenginių bei prietaisų konstruktoriams.

Kas vyksta kūnui deformuojantis? Mechaniškai veikiamo kūno atomai pasislenka iš pusiausvyros padėčių. Dėl to pakinta kūno forma ir tūris. Kiekviename deformuojamo kūno pjūvyje atsiranda tamprumo jėgos, neleidžiančios kūnui sutrūkinėti į atskiras dalis (13.3.1 pav.). Tokią kūno būseną apibūdina ***mechãninis į̃tempis – fizikinis dydis, lygus tamprumo jėgos modulio F_t ir kūno skerspjūvio ploto S santykiui:***



13.3.1 pav.

$$\sigma = \frac{F_t}{S}. \qquad (13.3)$$

SI sistemoje mechaninis įtempis matuojamas *paskãliais*[1]: $[\sigma] = 1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.

Huko dėsnis

Duomenys apie įvairių medžiagų mechanines savybes gaunami bandymais. Pavyzdžiui, tiriant tempimo deformaciją, viela tempiama specialiais įtaisais ir matuojamas jos pailgėjimas bei joje atsirandantis mechaninis įtempis. Bandymais gautą mechaninio įtempio priklausomybę nuo kūno santykio pailgėjimo, kai deformacija maža, nusako ***Hùko dė́snis: kūnui mažai deformuojantis, mechaninis įtempis σ yra tiesiogiai proporcingas kūno santykiniam pailgėjimui ε:***

$$\sigma = E|\varepsilon|; \qquad (13.4)$$

čia E – proporcingumo koeficientas.

[1] Primename, kad paskaliais matuojamas ir kūno slėgis.

Šioje formulėje parašytas santykinio pailgėjimo modulis $|\varepsilon|$, nes Huko dėsnis tinka ir tempimo, ir gniuždymo deformacijai. Gniuždomo kūno santykinis pailgėjimas, kaip žinome, yra neigiamas ($\varepsilon < 0$).

Tamprumo modulis

Huko dėsnio formulėje parašytas koeficientas E vadinamas ***tamprùmo mòduliu***, arba ***Jùngo mòduliu***[1]. Bet kokios formos ir matmenų kūnų, pagamintų iš tos pačios medžiagos, tamprumo modulis yra vienodas. Jis nustatomas bandymais. Išmatavus mechaninį įtempį σ ir kūno santykinį pailgėjimą ε, kai deformacija maža, tamprumo modulis apskaičiuojamas pagal formulę

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (13.5)$$

Iš jos matyti, kad tamprumo modulio matavimo vienetas yra toks pat kaip mechaninio įtempio, t. y. paskalis.

Kai kurių dažniausiai naudojamų medžiagų tamprumo modulio vertės nurodytos lentelėje:

Medžiagos	Tamprumo modulis E, Pa
Metalai	
Alavas	$5 \cdot 10^{10}$
Aliuminis	$7 \cdot 10^{10}$
Plienas	$2{,}2 \cdot 10^{11}$
Varis	$1{,}2 \cdot 10^{11}$
Statybinės ir buitinės medžiagos	
Guma	$7 \cdot 10^{6}$
Plyta	$7 \cdot 10^{9}$
Mediena (eglės)	
• išilgai plaušo	$1{,}3 \cdot 10^{10}$
• skersai plaušo	$3 \cdot 10^{6}$
Betonas	$2 \cdot 10^{10}$
Kaulas	$2{,}1 \cdot 10^{10}$
Langų stiklas	$7 \cdot 10^{10}$
Anglies pluoštas	$7{,}5 \cdot 10^{11}$

Kuo didesnis medžiagos tamprumo modulis, tuo mažiau deformuojasi iš jos pagamintas kūnas, kai kitos sąlygos (F_t, S ir l_0) vienodos. Vadinasi, *tamprumo*

[1] Jungo modulio pavadinimas yra sudarytas pagal klaidingai tariamą anglų mokslininko Tomo Jango (*Thomas Young*) pavardę.

modulis apibūdina medžiagos pasipriešinimą tampriajai tempimo (arba gniuždymo) deformacijai[1].

Primename, kad Huko dėsnio formulėje anksčiau naudotas *standumo koeficientas k apibūdina kūno pasipriešinimą deformacijai*. Tamprumo modulį E nesunku susieti su kūno standumo koeficientu k. Remkimės (13.4) formule. Į ją įrašykime mechaninio įtempio (13.3) ir santykinio pailgėjimo (13.2) išraiškas:

$$\frac{F_t}{S} = E\frac{|\Delta l|}{l_0}. \tag{13.6}$$

Iš čia išreikškime jėgą F_t:

$$F_t = \frac{SE}{l_0}|\Delta l|. \tag{13.7}$$

(13.7) lygybę palyginkime su Huko dėsnio matematine išraiška:

$$F_t = k|\Delta l|. \tag{13.8}$$

Iš jų matyti, kad tamprumo modulis E ir kūno standumo koeficientas k susiję taip:

$$k = \frac{SE}{l_0}. \tag{13.9}$$

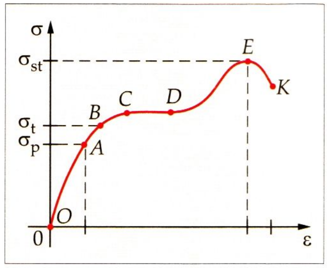
(13.9) formulė rodo, kad strypo standumo koeficientas k yra tiesiogiai proporcingas tamprumo modulio bei strypo skerspjūvio ploto S sandaugai ir atvirkščiai proporcingas jo ilgiui l_0. Vadinasi, kūno pasipriešinimą deformacijai lemia kūno parametrai ir medžiagos pasipriešinimas deformacijai (tamprumo modulis).

Tempimo diagrama. Proporcingumo ir tamprumo ribos

Mechaninio įtempio priklausomybės nuo kūno santykinio pailgėjimo (13.4) grafinis vaizdas vadinamas ***tempìmo diagramà***. Ji sudaroma pagal bandymo metu gautus duomenis. Horizontaliojoje koordinačių sistemos ašyje atidedamos bandinio santykinio pailgėjimo ε vertės, o vertikaliojoje – jas atitinkančios mechaninio įtempio σ vertės (13.3.2 pav.). Remdamiesi tempimo diagrama, paaiškinsime jums naujas proporcingumo ribos, tamprumo ribos, medžiagos takumo ir stiprumo ribos sąvokas.

[1] Fizikoje yra ir kitų dydžių, nusakančių pasipriešinimą. Pavyzdžiui, elektrinė varža R apibūdina laidininko pasipriešinimą elektros srovės tekėjimui.

Kai tempiamo kūno santykinis pailgėjimas yra nedidelis, mechaninis įtempis proporcingas tam pailgėjimui, t. y. galioja Huko dėsnis (diagramos dalis *OA*). Didžiausias įtempis σ_p (žr. 13.3.2 pav.), iki kurio dar galioja Huko dėsnis, vadinamas ***proporcingùmo ribà***. Diagramoje ją atitinka taškas *A*.



13.3.2 pav.

Toliau didinant bandinio apkrovą, deformacija bus netiesinė – įtempis jau nebus tiesiogiai proporcingas santykiniam pailgėjimui (diagramos dalis *AB*). Kai netiesinė deformacija yra nedidelė, nustojus veikti jėgai, bandinys atgauna savo formą ir matmenis. Didžiausias įtempis σ_t, dėl kurio poveikio dar neatsiranda didelės liekamosios deformacijos (santykinė liekamoji deformacija neviršija 0,1 %), vadinamas ***tamprùmo ribà***. Dauguma metalų patiria tampriąją deformaciją, jeigu $\varepsilon \leq 0{,}1$ %. Kiekvienas mažai deformuotas kūnas yra tamprus – jo forma ir matmenys atsistato. Medžiagos, kurių tamprumo riba (Huko dėsnio galiojimo riba) yra toli, vadinamos *tamprĩosiomis*. Pavyzdžiui, plienui Huko dėsnis tinka iki $\varepsilon = 1$ %, o gumai – iki dešimčių procentų.

Jeigu įtempis viršija tamprumo ribą σ_t, bandinio matmenys neatsistato, taigi jo deformacija yra plastinė (diagramos dalis *BC*). Bandinys lieka deformuotas. Medžiagos, kuriose nedidelės apkrovos sukelia plastinę deformaciją, vadinamos *plãstiškosiomis*. Plastilino ir šlapio molio tampriosios deformacijos sritis yra maža. Medžiagų skirstymas į tampriąsias ir plastiškąsias yra sąlygiškas. Ta pati medžiaga skirtingomis sąlygomis gali būti tampri arba plastiška. Pavyzdžiui, kambario temperatūros švinas yra plastiškas, o atšaldytas iki –100 °C – trapus.

Medžiagos takumas

Tempimo diagrama (13.3.2 pav.) rodo, kad, dar labiau didinant apkrovą, deformacija didėja vis greičiau. Kai mechaninis įtempis atitinka diagramos tašką *C*, kūnas ilgėja ir nedidinant apkrovos. Šis reiškinys vadinamas ***mẽdžiagos takumù*** (diagramos dalis *CD*). Diagramos kreivė šiuo atveju yra beveik horizontali. Medžiagos, kurių takumo sritis plati, gali nesuirdamos išlaikyti dideles deformacijas. Priešingai, jei medžiagų takumo sritis siaura arba jos beveik nėra, medžiagos gali išlaikyti tik nedideles deformacijas. Tai *trãpiosios mẽdžiagos*.

Trapūs yra stikliniai ir porcelianiniai dirbiniai. Patirtis rodo, kad jie sudūžta krisdami ir iš nedidelio aukščio. Trapus taip pat yra ketus, marmuras, gintaras. Tačiau plienas, švinas ir varis nėra trapūs.

Stiprumo riba

Už takumo ribos tempimo diagramos kreivė ima kilti ir pasiekia tašką *E*. Jame įtempio vertė yra didžiausia. Didžiausias mechaninis įtempis (atitinkantis tašką *E*), atsirandantis deformuojamame bandinyje prieš jam suyrant, vadinamas ***stiprùmo ribà*** σ_{st}. Paskui įtempis staiga sumažėja ir bandinys suyra (taškas *K*).

Stiprumo riba priklauso nuo medžiagos, iš kurios padarytas kūnas, ir jos apdirbimo. Kietųjų kūnų stiprumo didinimas yra aktualus, nes iš stiprių medžiagų galima sukurti patvarius įrenginius, pastatyti patikimus statinius. Plačiau apie kietųjų medžiagų kūrimo technologijas sužinosite kitoje temoje.

Klausimai ir užduotys

1. Kuo panašūs kietojo kūno įtempis ir slėgis? Kuo jie skiriasi?

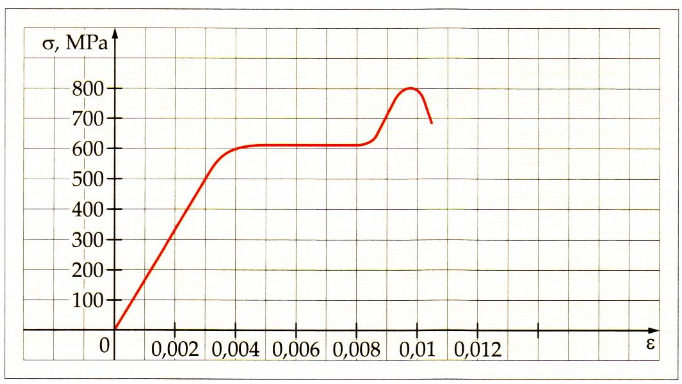
2. Ką apibūdina tamprumo modulis?

3. Ką apibūdina standumo koeficientas?

4. Nuo ko priklauso Huko dėsnio išraiškoje esantis standumo koeficientas?

5. Ką vadiname stiprumo riba? Kokia yra praktinė jos reikšmė?

13.3.3 pav.



6. Remdamiesi tempimo diagrama (13.3.2 pav.), atsakykite į tokius klausimus:
a) kurioje diagramos dalyje galioja Huko dėsnis;
b) kuriose diagramos dalyse nėra plastinės deformacijos;
c) kurios medžiagos – stiklo ar vario – takumo sritis diagramoje būtų platesnė?

7. Remdamiesi tempimo diagrama (13.3.3 pav.), atlikite tokias užduotis:
a) nustatykite medžiagos tamprumo, proporcingumo ir stiprumo ribas;
b) apskaičiuokite medžiagos tamprumo modulį.

8. Plūgas prie traktoriaus pritvirtintas plieniniu prikabintuvu, kurio leistinasis mechaninis įtempis 20 GPa. Dirvos pasipriešinimo plūgui jėga lygi $1{,}6 \cdot 10^5$ N. Apskaičiuokite prikabintuvo skerspjūvio plotą. (8 mm^2)

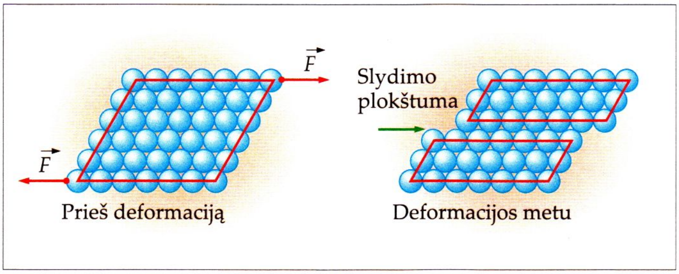
9. Lifto kabina kabo ant plieninio lyno, kurio skersmuo 3 cm. Kai liftas yra pirmame pastato aukšte, plieninio lyno ilgis didžiausias ir lygus 36 m. Pirmame aukšte į lifto kabiną įlipo penki žmonės, kurių bendra masė 320 kg. Apskaičiuokite lyno absoliutųjį pailgėjimą, žinodami, kad plieno tamprumo modulis $2{,}1 \cdot 10^{11}$ N/m^2. ($7 \cdot 10^{-4}$ m)

10. Plytų sienos aukštis 20 m, plytos tankis 1800 kg/m^3.
a) Apskaičiuokite plytų pamato mechaninį įtempį. ($3{,}53 \cdot 10^5$ Pa)
b) Ar vienodo tvirtumo plytos turi būti sienos apatinėje ir viršutinėje dalyje? Atsakymą pagrįskite.
c) Apskaičiuokite didžiausią sienos aukštį, kai plytos stiprumo riba lygi $3 \cdot 10^6$ Pa. (170 m)

13.4. Metalų stiprinimo būdai. Kompozitai

Mechaninės medžiagų savybės priklauso nuo medžiagų sandaros. Norėdami suprasti, kas lemia metalų atsparumą deformacijoms, turime prisiminti metalų sandarą. Kiekvienas metalo atomas turi vieną ar kelis išorinius elektronus, kurie gali laisvai judėti tarp atomų. Šie elektronai sudaro tarytum neigiamo krūvio „jūrą“, kuri juda tarp tvarkingai išsidėsčiusių teigiamųjų metalo jonų. Jonų ir laisvųjų elektronų tarpusavio traukos jėga sudaro metališkąjį ryšį. Tarp metalo jonų nėra kryptingų ryšių, kurie fiksuoja

13.4.1 pav.



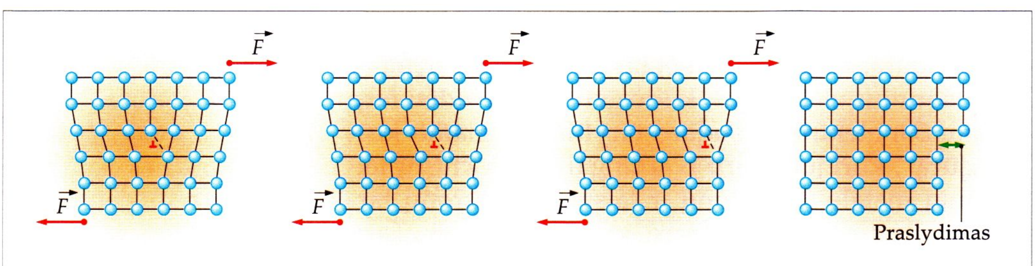
13.4.2 pav.

gretimus atomus. Todėl atomų padėtį pakeisti nesunku. Dėl šios priežasties metalus galima kalti ir tempti. Išlydytam metalui kietėjant, pradeda formuotis polikristalinė jo struktūra. Ji susidaro iš daugelio mažų kristalų – kristalitų, kurių sienelės orientuotos įvairiomis kryptimis (13.4.1 pav.).

Nuo kristalitų dydžio ir sienelių savybių priklauso mechaninės metalo savybės. Kai metalą veikia apkrova, jo atomų plokštumos juda viena kitos atžvilgiu (13.4.2 pav.). Ryšiams tarp atomų plokštumų nutraukti reikia didelės jėgos. Plokštumai pasislinkus tam tikru atstumu, ryšiai tarp atomų vėl gali susidaryti. Pavyzdžiui, šie procesai vyksta, kai deformuojamas metalinis bandinys susiaurėja, tačiau dar nenutrūksta. Įvairiai orientuotos polikristalinio kūno kristalitų sienelės trukdo slysti atomų plokštumoms. Tai mažina polikristalų tąsumą, kalumą.

Dideliuose metalo monokristaluose atomų plokštumos slysta lengviau, nes jos nenutrūkdamos tęsiasi per visą monokristalą. Vadinasi, monokristalai yra plastiškesni už polikristalus. Monokristalų kalumą ir tąsumą padidina defektai, vadinami dislokacijomis (13.4.3 pav.). Dislokacija – tai kristalinės gardelės vieta, kurioje nutrūksta viena atomų (ar jonų) plokštuma. Dislokacijos vietoje ryšiai yra silpnesni. Šlytį su-

13.4.3 pav.



kelianti jėga pastumia vieną atomų plokštumą per vieną gardelės tarpsnį. Šis procesas panašus į kilimo klostės pastūmimą: klostę pastumti lengviau negu visą kilimą. Tačiau, patraukiant klostę, pastumiamas ir visas kilimas (13.4.4 pav.). Įterpus kitų elementų atomų, galima pristabdyti dislokacijų plitimą ir kartu sustiprinti medžiagą.

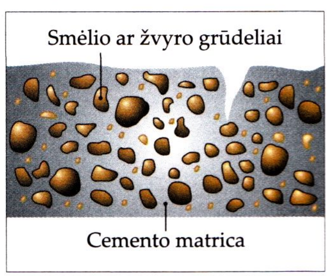
Aptarėme, kaip padidinti medžiagų plastiškumą. Tačiau svarbi dar viena mechaninė medžiagos savybė – tvirtumas. Kaip padidinti jį? Praktika rodo, kad medžiagos būna trapios, jeigu jos lengvai įtrūksta ir tie įtrūkimai plinta. Pasiekę atsparesnę medžiagą, jie gali sustoti. Atsižvelgiant į tai, gaminamos tvirtos medžiagos, vadinamos kompozìtais (lot. *compositus* – sudėtinis). Vientisas kompozito komponentas vadinamas mãtrica. Į ją įterpiama intarpų – viena ar keletas kitų atsparesnių medžiagų. Pavyzdžiui, betonas yra kompozitas. Jo matrica – cementas (13.4.5 pav.), o intarpas – smėlio ir žvyro grūdeliai. Įskilimas plinta cementu, tačiau, pasiekęs smėlio ir žvyro grūdelius, sustoja.

13.4.4 pav.

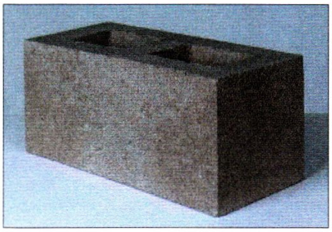
Technikoje kompozito sąvoka pradėta vartoti XIX a., o statybose – XX a. viduryje. Kompozitai naudojami visose technikos ir kasdienio gyvenimo srityse – pradedant virtuve ir baigiant kosminiais laivais. Jų poreikis ypač išaugo atsiradus būtinybei plačiau naudoti lengvesnes ir stipresnes medžiagas statant dangoraižius, šiltesnius ir greičiau surenčiamus gyvenamuosius namus, tiltus, gaminant erdvėlaivius.

Pirmieji šiuolaikinių kompozitų prototipai atsirado daugiau kaip prieš 5000 m. pr. Kr. ir buvo naudojami statybose. Į saulėje išdžiovintas molio plytas buvo dedama susmulkintų akmenų arba organinių medžiagų. Žmonės pastebėjo, kad tokios plytos mažiau trūkinėja. Trečiajame tūkstantmetyje pr. Kr. Egiptè ir Mesopotãmijoje iš bitumine smala suklijuotų nendrių buvo daromos valtys. Tai yra dabartinio stiklo plastiko, gaminamo iš dirbtinių komponentų – stiklo pluošto ir polimerų, – prototipas. Nendrės ir ypač jų pluoštas – palyginti stipri ir lengva poringa medžiaga, o bituminė derva suklijuoja iš tokių pluoštų padarytą gaminį, jį sustiprina, daro nelaidų vandeniui. Kiekvienas šių komponentų atskirai visų šių savybių neturi.

13.4.5 pav.



Pirmasis mūsų eros tūkstantmetis nepasižymėjo gerų kompozicinių medžiagų gamyba. Tik XX a.



13.4.6 pav.

viduryje buvo sukurti nauji kompozitai, vadinamieji boro plastikai, kurie 10–15 kartų stipresni ir 3–4 kartus lengvesni už statybinį plieną. Septintąjį perėjusio amžiaus dešimtmetį, išradus labai didelio tamprumo modulio ir stiprumo anglies pluoštus, buvo sukurta kompozitų su dar geresnėmis savybėmis.

Pereito amžiaus ketvirtojo dešimtmečio pabaigoje kompozitų gamybai pradėtas naudoti išlydytas stiklas, ištemptas į ilgą pluoštą. Kompozitai, turintys stiklo pluošto, yra labai stiprūs. Jų stiprumas tempiant yra daugiau kaip 60 kartų didesnis negu metalo, naudojamo automobilių kėbulams gaminti. Per pastaruosius dvidešimt penkerius metus kompozitų naudojimas transporto priemonių gamybai išaugo daugiau kaip 10 kartų. Kompozitų naudojimas lėktuvų gamybai turi didelį ekonominį efektą. Stiklo plastikų santykinis stiprumas yra 5–6 kartus didesnis negu pagrindinių medžiagų, iš kurių gaminami lėktuvai (aliuminio, boro). Be to, stiklo plastikai yra lengvesni. Jie leido sumažinti lėktuvų masę daugiau kaip du kartus.

Kompozitai šiuo metu plačiai naudojami statybose. Jie suteikia statiniams didesnį stiprumą, pastovumą, standumą naudojant mažiau medžiagų. Kompozitai leidžia sumažinti pastatų svorį, naudoti mažesnio skerspjūvio konstrukcijas. Pavyzdžiui, 1890 m. Čikāgoje pastatyto aukščiausio pasaulyje (18 aukštų) pastato „Garrick Building" pirmųjų aukštų mūro sienų storis buvo 1,8 m. Šio pastato sienos 1 m^2 svėrė apie 4 t. Šiuo metu statomų dangoraižių 1 m^2 sienos, pagamintos iš kompozitų, nesveria nė 300 kg. Kompozitai pagerina pastato termoizoliacines ir akustines savybes, atpigina jo statybą, nes sumažėja konstrukcijų gamybos energija, transportavimo ir montavimo išlaidos.

13.4.7 pav.

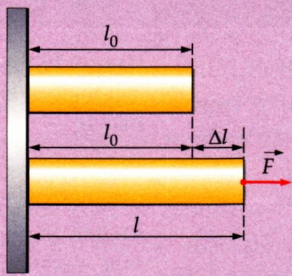
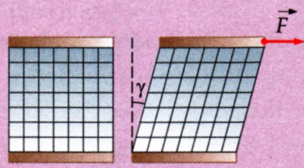
a

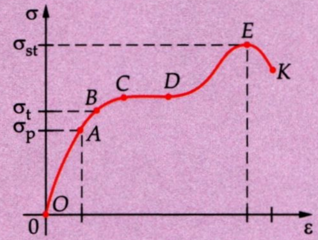
b

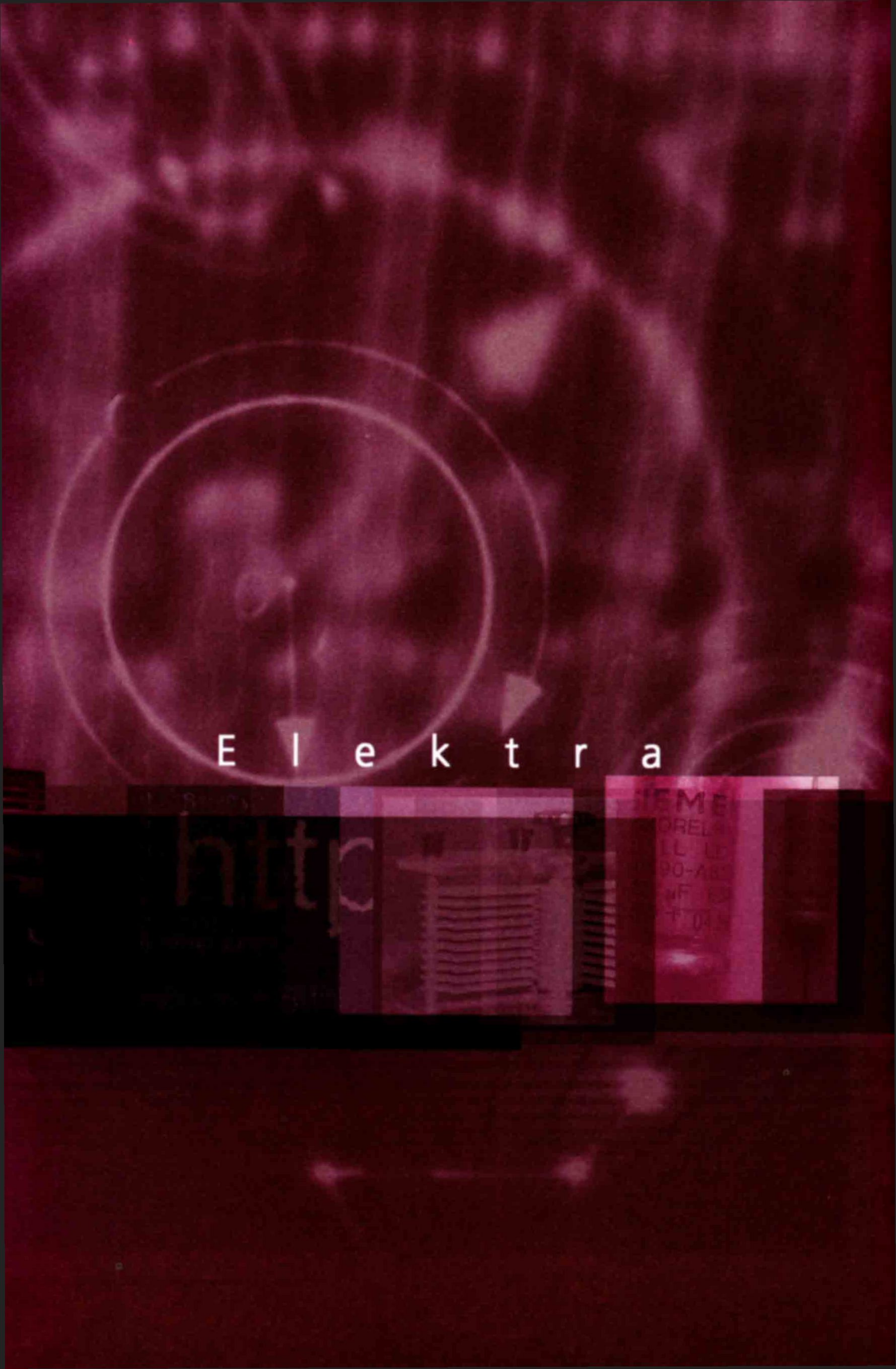
Lietuvoje iš kompozitų gaminamos termoizoliacinės medžiagos, denginių konstrukcijos su vidiniais termoizoliaciniais sluoksniais, keramzitbetonio blokeliai (13.4.6 pav.). Jie gaminami iš keramzito, cemento ir vandens. Keramzitas – aukštoje temperatūroje kepto molio granulės. Jis pasižymi geromis termoizoliacinėmis savybėmis. Rišamoji medžiaga yra cementas. Kompozitai naudojami ir buityje. Iš jų gaminami stalviršiai, plautuvės (13.4.7 pav.). (Buityje ši medžiaga vadinama dirbtiniu akmeniu.) Be to, kompozitai naudojami stomatologijoje, avalynės ir audinių gamyboje.

Skyriaus „Kietieji kūnai“ apibendrinimas

Kristaliniai kūnai	Kietieji kūnai, kurių atomai (molekulės arba jonai) erdvėje išsidėstę tvarkingai, vadinami kristaliniais kūnais, arba kristalais.
Amorfiniai kūnai	Kietieji kūnai, kurių tvarkingai išsidėstę tik artimiausi atomai, vadinami amorfiniais kūnais. • Kai temperatūra žema, amorfinių kūnų savybės panašios į kietųjų kūnų. • Kai temperatūra aukšta, amorfinių kūnų savybės panašios į skysčių.
Anizotropija	Kristalo fizinių savybių priklausomybė nuo krypties kristalo viduje vadinama anizotropija.
Izotropija	Kristalo fizinių savybių nepriklausymas nuo krypties kristalo viduje vadinama izotropija.
Polikristalas	Kietasis kūnas, sudarytas iš daugybės tarpusavyje suaugusių kristalėlių (kristalitų), vadinamas polikristalu.
Deformacijos rūšys	• Tampriąja vadinama deformacija, kuri visiškai išnyksta nustojus veikti išorinėms jėgoms. • Plastine vadinama deformacija, kuri neišnyksta nustojus veikti išorinėms jėgoms.
Tempimo deformacija	Ji reiškiasi tada, kai jėgos veikia kūną viena tiese priešingomis kryptimis į išorę.
Gniuždymo deformacija	Ji reiškiasi tada, kai jėgos veikia kūną viena tiese priešingomis kryptimis į vidų.

Absoliutusis pailgėjimas	Absoliutusis pailgėjimas yra fizikinis dydis, lygus deformuojamo kūno galinio ilgio l ir pradinio ilgio l_0 skirtumui: $$\Delta l = l - l_0;$$ $$[\Delta l] = 1 \text{ m}.$$ 
Santykinis pailgėjimas	Santykinis pailgėjimas yra fizikinis dydis, lygus kūno absoliučiojo pailgėjimo Δl ir pradinio ilgio l_0 santykiui: $$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$
Šlijimo deformacija	Deformacija, kurios metu kūno sluoksniai pasislenka lygiagrečiai vieni kitų atžvilgiu, vadinama šlijimo deformacija. Ją apibūdina šlyties kampas γ. 
Mechaninis įtempis	Mechaniniu įtempiu vadinamas fizikinis dydis, lygus tamprumo jėgos modulio F_t ir kūno skerspjūvio ploto S santykiui: $$\sigma = \frac{F_t}{S}.$$
Huko dėsnis	Kūnui mažai deformuojantis, mechaninis įtempis σ yra tiesiogiai proporcingas kūno santykiniam pailgėjimui ε: $$\sigma = E\|\varepsilon\|;$$ čia E – tamprumo modulis, arba Jungo modulis. Jis nustatomas bandymais pagal formulę $$E = \frac{\sigma}{\|\varepsilon\|}.$$

	• Tamprumo modulis apibūdina medžiagos, iš kurios padarytas kūnas, pasipriešinimą tampriajai tempimo (arba gniuždymo) deformacijai. • Kuo didesnis medžiagos tamprumo modulis, tuo mažiau deformuojasi kūnas.
Tempimo diagrama	Mechaninio įtempio priklausomybės nuo kūno santykinio pailgėjimo grafinis vaizdas vadinamas tempimo diagrama. 
Proporcingumo riba	Didžiausias įtempis σ_p, iki kurio dar galioja Huko dėsnis, vadinamas proporcingumo riba (ją atitinka tempimo diagramos taškas *A*).
Tamprumo riba	Didžiausias įtempis σ_t, dėl kurio poveikio dar neatsiranda didelės liekamosios deformacijos, vadinamas tamprumo riba (ją atitinka tempimo diagramos taškas *B*).
Medžiagos takumas	Deformuoto kūno ilgėjimas nedidinant apkrovos vadinamas medžiagos, iš kurios padarytas kūnas, takumu (tempimo diagramos dalis *CD*).
Stiprumo riba	Didžiausias mechaninis įtempis, atsirandantis deformuojamame kūne prieš jam suyrant, vadinamas stiprumo riba σ_{st} (ją atitinka tempimo diagramos taškas *E*).


Elektra

14 Elektrostatika

Šiame skyriuje plačiau susipažinsite su elektros krūviu, elektriniu lauku, nagrinėsite du svarbiausius elektrostatikos dėsnius: elektros krūvio tvermės dėsnį ir Kulono (krūvių sąveikos) dėsnį, be to, sužinosite, kas atsitinka laidininkams ir dielektrikams, kai jie patenka į elektrinį lauką. Skyriaus pabaigoje nagrinėsite kondensatorių, išsiaiškinsite, nuo ko priklauso jo elektrinė talpa, sužinosite, kaip apskaičiuojama įkrauto kondensatoriaus energija ir kondensatorių baterijos talpa.

14.1. Elektros krūvis. Kūnų įsielektrinimas. Elektros krūvio tvermės dėsnis

Pagrindinės sąvokos

Elektrodinãmika, elektrostãtika, elementarióji dalẽlė, elektrìngoji dalẽlė, elèktros krũvis, elementarùsis elèktros krũvis.

Sąveika gamtoje

Gamtoje reiškiasi keturių rūšių sąveika: gravitacinė, silpnoji, elektromagnetinė ir stiprioji. Visi procesai gamtoje (obuolio kritimas, supernovos sprogimas, žiogo šuolis ar radioaktyvusis skilimas) vyksta būtent dėl šių sąveikų.

Apie gravitacinę sąveiką sužinojote mokydamiesi mechanikos. Ši sąveika yra universali, ji reiškiasi tarp visų dalelių, turinčių masę. Gravitacinė sąveika priklauso nuo kūno masės. Mikropasaulyje jos įtaka maža, o makropasaulyje – nepaprastai didelė. Būtent ši sąveika paaiškina planetų, žvaigždžių ir galaktikų judėjimą. Jos veikimo nuotolis didelis.

Stiprioji sąveika būdinga atomo branduoliui. Ji užtikrina atomo branduolio, o kartu ir visų medžiagų stabilumą. Stiprioji sąveika veikia labai mažais atstumais, maždaug 10^{-15} m. Taigi jos veikimo nuotolis yra mažas, prilygsta atomo branduolio matmenims.

Silpnoji sąveika milijoną kartų silpnesnė už stipriąją. Jos veikimo nuotolis 10^{-17} m. Silpnoji sąveika paaiškina branduolių skilimą, termobranduolines reakcijas. Stipriąją ir silpnąją sąveiką plačiau gvildensime nagrinėdami atomo fiziką.

Elektromagnetinė sąveika reiškiasi tarp elektringųjų dalelių (pavyzdžiui, tarp elektronų ir atomų branduolių). Gravitacinė sąveika būdinga kūnams, turintiems masę, analogiškai elektromagnetinė sąveika – kūnams, turintiems elektros krūvį. Elektromagnetinė sąveika sieja atomus ir molekules. Ja aiškinama tamprumo bei trinties jėgų prigimtis ir daugelis kitų reiškinių. Elektromagnetinė sąveika reiškiasi dideliais atstumais. Fizikos skyrius, nagrinėjantis elektromagnetinę sąveiką, vadinamas ***elektrodinãmika***. ***Elektrodinamika – fizikos mokslo šaka, nagrinėjanti elektromagnetinio lauko, sukeliančio įelektrintų kūnų***

arba elektringųjų dalelių sąveiką, savybes ir dėsningumus. Pritaikius praktikoje elektromagnetinius reiškinius, iš esmės pasikeitė žmonių gyvenimas. Šiandienos visuomenė neįsivaizduojama be plataus elektros energijos taikymo: kompiuterių, mobiliųjų telefonų, buitinių elektrinių prietaisų ir kt.

Šiais mokslo metais nagrinėsite patį paprasčiausią elektromagnetinės sąveikos atvejį – nejudančių elektringųjų dalelių sąveiką. Elektrodinamikos dalis, tirianti tokią sąveiką, vadinama ***elektrostãtika***.

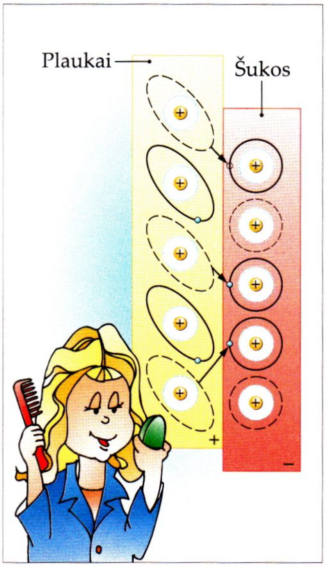
Elektros krūvis

Elektros krūvis yra viena svarbiausių elektrostatikos sąvokų. Be jos neišsiversime nė vienoje šio skyriaus temoje. Tai pirminė elektrostatikos sąvoka, neskaidoma į paprastesnes. Kokia jos prasmė? Kas yra elektros krūvis?

Kaip žinome, visi kūnai sudaryti iš dalelių. Mažiausias, nebedalomas daleles vadiname ***elementariõsiomis dalẽlėmis***. Kadangi elementariosios dalelės turi masę, tai jos veikia viena kitą gravitacijos jėgomis. Pastebėta, kad kai kurių elementariųjų dalelių sąveikos jėgos yra daug stipresnės už gravitacijos jėgas. Ši sąveika – elektromagnetinė. Jei tarp dalelių atsiranda elektromagnetinė sąveika, sakoma, kad dalelės turi elektros krūvį. ***Elèktros krū̃vis – fizikinis dydis, rodantis elektromagnetinės sąveikos intensyvumą.*** Taigi jis yra ne kūno ar elementariosios dalelės sudedamoji dalis, o savybė, lemianti jų sąveiką su kitomis dalelėmis ar kūnais. Dalelės, turinčios šią savybę, vadinamos ***elektrìngosiomis dalẽlėmis***.

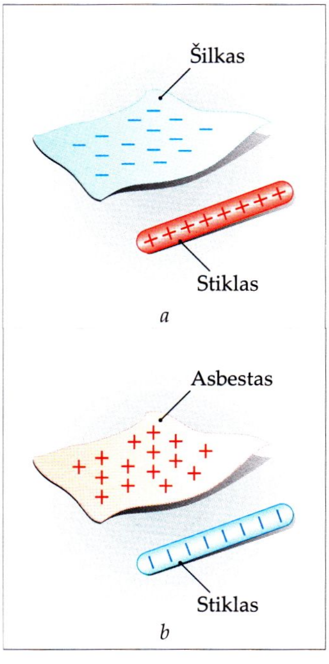
Kuo didesnis elektros krūvis, tuo stipresnė elektromagnetinė sąveika ir atvirkščiai. Gravitacinės sąveikos stiprį lemia kūno masė. Ta prasme elektros krūvis ir kūno masė yra panašūs. Tačiau jie turi ir skirtumų. Pavyzdžiui, masę turi kiekviena dalelė. Dalelė be masės neegzistuoja, o elektros krūvį kūnas gali įgyti arba jo netekti.

Elementariosios dalelės elektronas ir protonas yra mažiausios stabilios elektringosios dalelės. Jų krūvis vadinamas elementariuoju. Taigi ***elementariúoju elèktros krūviù*** vadinamas pats mažiausias krūvis. Jį turi visos elektringosios elementariosios dalelės. Elementarusis elektros krūvis žymimas raide *e*. Bandymais nustatyta skaitinė jo vertė lygi $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C.



14.1.1 pav.

14.1.2 pav.



Bet kurio įelektrinto kūno krūvis q proporcingas elementariajam krūviui:

$$q = ne. \quad (14.1)$$

Elektrono krūvis – pats mažiausias neigiamas daugiau nedalomas elektros krūvis: $e = -1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C. Protono krūvio skaitinė vertė yra tokia pati kaip elektrono, tačiau protono krūvis teigiamas. Pavadinimai „teigiamasis krūvis“, „neigiamasis krūvis“ yra sąlygiški. Pavyzdžiui, elektrono krūvį būtų galima laikyti teigiamu, o protono – neigiamu. Elektriškai neutralus atomas turi vienodą skaičių protonų ir elektronų.

Kūnų įsielektrinimas

Įgijęs papildomai elektronų, neutralus kūnas įsielektrina neigiamai, o jų netekęs – teigiamai. Kaip kūnai įsielektrina? Kas juose tuo metu vyksta?

Perbraukime šukomis per sausus plaukus. Plaukai įsielektrins teigiamai, šukos – neigiamai, mat nedidelė dalis elektronų šukuojantis pereis iš plaukų į šukas (14.1.1 pav.). Kodėl? To priežastis – nevienoda plaukų ir šukų atomų branduolių bei elektronų trauka. Plaukų atomų elektronai yra silpnai susiję su branduoliu ir lengvai nuo jo atitrūksta. Neutralus plaukų atomas virsta teigiamuoju jonu, o plaukai įsielektrina teigiamai. Šukų atomai, kurių elektronai stipriai susiję su branduoliais, prisijungia papildomų elektronų ir virsta neigiamaisiais jonais. Šukos dėl to įsielektrina neigiamai.

Kūnams įsielektrinant, elektronų poslinkis būna ne didesnis už atstumą tarp atomų (10^{-8} cm), todėl elektronams pereiti iš vieno kūno į kitą reikalingas glaudus kontaktas. Kūnus trinant vieną į kitą, padidėja glaudaus kontakto sričių ir daugiau elektronų pereina iš vieno kūno į kitą. Tas pats kūnas, trinamas į skirtingus kūnus, gali įsielektrinti nevienodai. Pavyzdžiui, trinamas į šilką stiklas įsielektrina teigiamai (14.1.2 pav., *a*), o į asbestą – neigiamai (14.1.2 pav., *b*).

Šiek tiek pakinta ir įsielektrinančių kūnų masė: įsielektrinančio teigiamai – sumažėja, neigiamai – padidėja.

Kūnai įsielektrina ne tik trinami vienas į kitą, bet ir suliesti. Šis reiškinys svarbus praktiniu požiūriu.

Daktiloskopijoje jis taikomas pirštų atspaudams aptikti (14.1.3 pav.). Liesdami pinigų kupiūrą, pirštai palieka joje labai mažų teigiamai įelektrintų baltymų dalelių, kurios pritraukia neigiamai įelektrintas aukso dulkeles, dengiančias kupiūros paviršių. Taip iš aukso dulkelių susiformuoja pirštų atspaudas.

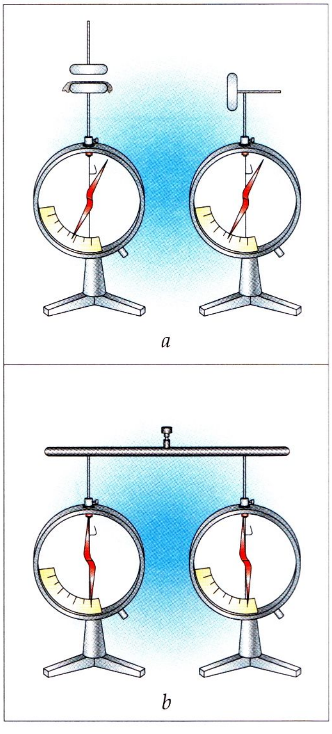
Kūnai gali įsielektrinti ir apšviesti arba pašildyti.

14.1.3 pav.

Elektros krūvio tvermės dėsnis

Elektros krūvis yra tvarus. Tai patvirtina bandymais nustatytas ***elèktros krū̃vio tvermė̃s dė́snis***. Patikrinkime jį, atlikdami bandymą su dviem elektrometrais. Prie vieno iš jų virbalo pritvirtinkime metalinį diską, o ant jo uždėkime kitą tokį pat diską su izoliatoriaus rankenėle. Tarp diskų įkiškime skiautelę audinio (pavyzdžiui, gelumbės). Viršutiniu disku keletą kartų perbraukime per audinį ir palieskime kito elektrometro virbalą. Šio elektrometro rodyklė pakrypsta apytiksliai tokiu pat kampu kaip ir pirmojo (14.1.4 pav., *a*). Tai rodo, kad *tuo pačiu metu įsielektrina abu susiliečiantys kūnai*: pirmasis diskas su gelumbe ir antrasis diskas.

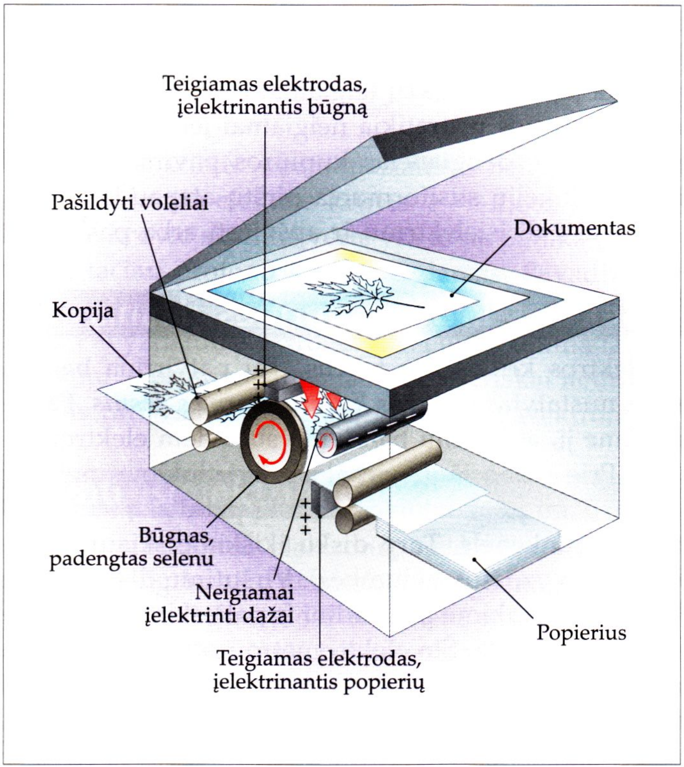
14.1.4 pav.



Laidininku sujunkime abiejų elektrometrų virbalus (14.1.4 pav., *b*). Elektrometrų rodyklės sugrįžo į pradinę padėtį. Vadinasi, elektrometrų virbalai išsielektrino, jų krūvis neutralizavosi. Tai rodo, kad bendras abiejų diskų krūvis lygus nuliui. Šis ir panašūs bandymai patvirtina, kad *susiliečiančiuose kūnuose visuomet atsiranda vienodo modulio, bet priešingų ženklų krūviai*. Visais atvejais krūviai persiskirsto, tačiau bendra jų suma nekinta. Tai nusako krūvio tvermės dėsnis, teigiantis, kad ***visų sąveikaujančių uždarosios sistemos kūnų elektros krūvių algebrinė suma yra pastovi:***

$$q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_n = \text{const.} \qquad (14.2)$$

Gamtoje niekada neatsiranda ir neišnyksta be pėdsako vieno ženklo krūvis. Kartu su neigiamuoju krūviu $-q$ visada sukuriamas to paties modulio teigiamasis krūvis $+q$. Nei neigiamasis, nei teigiamasis krūvis negali išnykti atskirai vienas nuo kito. Jeigu jų moduliai lygūs, jie gali tik kompensuoti vienas kitą.



14.1.5 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Išvardykite jums žinomas sąveikos rūšis. Kuo elektromagnetinė sąveika skiriasi nuo kitų sąveikų? Pateikite elektromagnetinės sąveikos pavyzdžių.

2. Kas yra elektros krūvis? Nurodykite krūvio ir masės panašumus bei skirtumus.

3. Kas yra elementarusis elektros krūvis? Kokia yra elementariojo krūvio skaitinė vertė?

4. Paaiškinkite kūnų įsielektrinimo reiškinį. Pateikite jo pavyzdžių.

5. Suformuluokite elektros krūvio tvermės dėsnį.

6. Šiuo metu plačiai naudojami kopijavimo aparatai. Vieno iš jų sandara pavaizduota 14.1.5 paveiksle. Kopijavimo aparato būgnas, padengtas selenu, įelektrinamas teigiamai. Tos būgno dalys, kurias paveikia šviesa, išsielektrina, o kitos, neapšviestos, lieka įelektrintos teigiamai. Remdamiesi paveikslu, pabaikite aiškinti, kaip susidaro dokumento kopija.

14.2. Kulono dėsnis

Įelektrintų kūnų sąveika

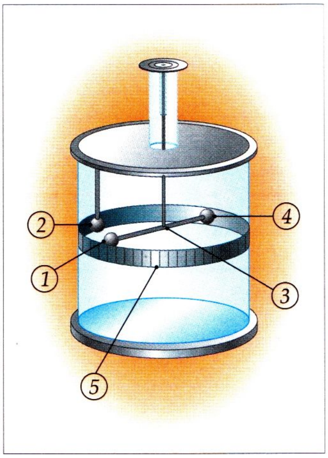
Įelektrinti kūnai veikia vienas kitą. Dar VI a. pr. Kr. graikai pastebėjo, kad gintaras, patrintas vilna, traukia lengvus kūnus. XVI a. nustatyta, jog ši savybė būdinga ne tik gintarui, bet ir kitiems kūnams. Ji buvo pavadinta elektrine (gr. *elektron* – gintaras). Bandymais ištirta, kad vienodų ženklų krūviais įelektrinti kūnai vienas kitą stumia, o priešingų ženklų – traukia. Koks yra įelektrintų kūnų sąveikos jėgos didumas? Nuo ko jis priklauso?

Šią jėgą pirmą kartą 1785 m. išmatavo prancūzų mokslininkas Šarlis Kulonas (*Charles Coulomb*, 1736–1806). Bandymams jis naudojo sukamąsias svarstykles (14.2.1 pav.). Ant tamprios vielelės mokslininkas horizontaliai pakabino stiklinį strypelį *3* ir viename jo gale įtvirtino metalinį rutuliuką *1*, o kitame – atsvarą *4*. Dar vieną rutuliuką *2* nejudamai įtvirtino svarstyklių sienelėje. Rutuliukų matmenys buvo daug mažesni už atstumą, kuriuo reiškėsi jų sąveika, todėl rutuliukus buvo galima laikyti ***taškìniais kū́nais***.

Įelektrinti vienodų ženklų krūviais, rutuliukai vienas kitą stūmė, dėl to stiklinis strypelis pasisukdavo (14.2.2 pav.). *1* rutuliuko padėtį Kulonas nustatydavo pagal skalę *5*. Iš strypelio posūkio kampo buvo sprendžiama apie įelektrintų rutuliukų sąveikos jėgos didumą. Kulonas nustatė, kad sąveikos jėga priklauso nuo rutuliukų krūvio ir atstumo tarp jų. Apibendrinus bandymo rezultatus, buvo suformuluotas dėsnis, vadinamas ***Kulòno dė́sniu***.

Pagrindinės sąvokos

Taškìnis kū́nas,
centrìnė jėgà,
kulònas,
elektrìnė konstánta.



14.2.1 pav.

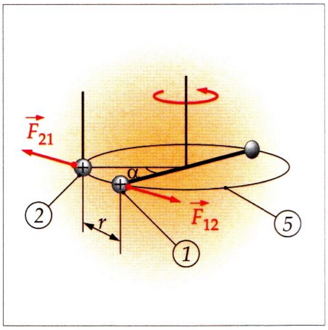
Kulono dėsnis

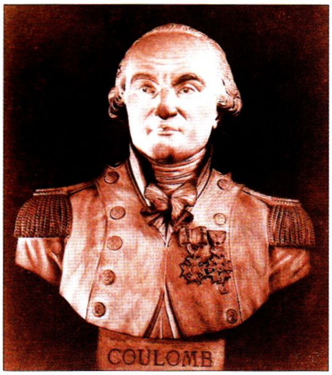
Kulono dėsnis teigia, kad ***dviejų taškinių nejudančių įelektrintų kūnų sąveikos jėga vakuume yra tiesiogiai proporcinga jų krūvių modulių sandaugai ir atvirkščiai proporcinga atstumo tarp jų kvadratui.*** Įelektrintų kūnų krūvį pažymėję q_1 ir q_2, o atstumą tarp tų kūnų – r, galime užrašyti matematinę Kulono dėsnio išraišką:

$$F = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}; \qquad (14.3)$$

čia k – proporcingumo koeficientas.

14.2.2 pav.

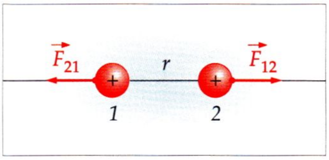




Šarlis Kulonas

Nejudančių įelektrintų kūnų sąveika vadinama elektrostatine, arba Kulono, sąveika. Šios sąveikos jėga priklauso nuo terpės, kurioje yra įelektrinti kūnai, savybių.

Dviejų nejudančių taškinių įelektrintų kūnų sąveikos jėgos veikia išilgai tiesės, jungiančios tuos kūnus (14.2.3 pav.). Tokios jėgos vadinamos ***centrìnėmis jėgomìs***. Pagal trečiąjį Niutono dėsnį $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.



14.2.3 pav.

Elektros krūvio matavimo vienetas

Tarptautinėje sistemoje elektros krūvio matavimo vienetas yra *kulònas* (žymimas C). Prie pagrindinių SI vienetų jis nepriskiriamas, o apibrėžiamas remiantis elektros srovės stiprio matavimo vienetu – amperu. ***Vienas kulonas (1 C) yra krūvis, kurį 1 A stiprio elektros srovė perneša laidininko skerspjūviu per 1 s.***

1 C – labai didelis elektros krūvis. Pavyzdžiui, dviejų taškinių kūnų, kurių kiekvieno krūvis lygus 1 C ir kurie nutolę vienas nuo kito 1 km, sąveikos jėga nedaug mažesnė už jėgą, kuria Žemės rutulys traukia 1 t masės krovinį.

Elektrinė konstanta

Iš Kulono dėsnio išreikškime proporcingumo koeficientą k:

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|}. \qquad (14.4)$$

Jo vertę galima nustatyti bandymais. Išmatavus dviejų kūnų, kurių krūvis žinomas, sąveikos jėgą ir į (14.4) formulę įrašius atitinkamas vertes, gaunama tokia proporcingumo koeficiento k vertė:

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2. \qquad (14.5)$$

Koeficientas k tarptautinėje sistemoje paprastai užrašomas taip:

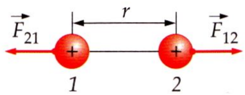
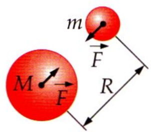
$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}. \qquad (14.6)$$

Dydis ε_0 vadinamas ***elektrinè konstánta***. Iš (14.6) formulės išreikškime elektrinę konstantą ir apskaičiuokime jos vertę:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}. \qquad (14.7)$$

Elektrostatinės ir gravitacijos jėgos palyginimas

Kulono dėsnis savo matematine išraiška primena visuotinės traukos dėsnį. Pagal Kulono dėsnį apskaičiuojama elektrostatinė jėga, o pagal visuotinės traukos dėsnį – gravitacijos jėga:

Elektrostatinė jėga	Gravitacijos jėga
	
$F_{12} = F_{21} = k\dfrac{\lvert q_1\rvert \lvert q_2\rvert}{r^2}$	$F = G\dfrac{mM}{R^2}$

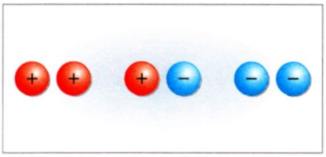
Tiek elektrostatinės, tiek gravitacinės sąveikos jėga priklauso nuo atstumo tarp sąveikaujančių kūnų kvadrato. Gravitacijos jėga proporcinga sąveikaujančių kūnų masių sandaugai, o elektrostatinė – krūvių sandaugai. Palyginkime šias jėgas, atsirandančias tarp vandenilio atomo elektrono ir branduolio. Vandenilio atomo branduolį sudaro vienas protonas, aplink jį skrieja vienas elektronas. Elektrostatinė vandenilio atomo branduolio ir elektrono sąveikos jėga lygi $8{,}2 \cdot 10^{-8}$ N, šių dalelių gravitacijos jėga lygi $3{,}6 \cdot 10^{-47}$ N. Taigi elektrostatinė jėga $2{,}3 \cdot 10^{39}$ kartų didesnė už gravitacijos jėgą. Beveik tiek pat kartų mūsų Galaktikos masė didesnė už žmogaus masę. Nepaisant to, būtent gravitacijos jėgos formuoja Visatos struktūrą. Kodėl?

Makroskopiniai kūnai yra elektriškai neutralūs. Elektrostatinės jėgos tarp jų atsiranda tik dėl nedidelio perteklinio elektros krūvio, o gravitacinė sąveika – dėl visų elementariųjų dalelių, sudarančių makroskopinius kūnus, traukos. Dėl to šių jėgų įtaka yra didesnė.

Klausimai ir užduotys

1. Suformuluokite Kulono dėsnį. Kokios savybės būdingos elektrostatinėms jėgoms?

2. Kokia yra koeficiento *k*, esančio Kulono dėsnyje, fizikinė prasmė?



14.2.4 pav.

3. 14.2.4 paveiksle pavaizduotos įelektrintų rutuliukų poros. Persipieškite jas savo sąsiuvinyje ir pažymėkite rutuliukus veikiančias jėgas. Tarkite, kad rutuliukų krūviai yra vienodo didumo.

4. Du taškiniai įelektrinti kūnai, kurių kiekvieno krūvis lygus 1 μC, nutolę 30 cm atstumu vienas nuo kito. Apskaičiuokite šių kūnų elektrostatinės sąveikos jėgą. (0,1 N)

5. Du vienodi taškiniai įelektrinti kūnai nutolę vienas nuo kito 0,5 m atstumu. Jų elektrostatinės sąveikos jėga lygi 3,6 N. Apskaičiuokite kiekvieno kūno krūvį. (10^{-5} C)

6. Vandenilio atomo spindulys $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m, elektrono masė $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, protono masė $1{,}6 \cdot 10^{-27}$ kg. Apskaičiuokite:

a) vandenilio elektrono ir branduolio elektrostatinės sąveikos jėgą ir gautą vertę palyginkite su skyrelyje paminėta verte;

b) vandenilio elektrono ir branduolio gravitacinės sąveikos jėgą ir gautą vertę palyginkite su skyrelyje paminėta verte.

7. Du vienodi įelektrinti rutuliukai nutolę vienas nuo kito 0,5 m atstumu. Vieno rutuliuko krūvis $8 \cdot 10^{-9}$ C, kito $-4 \cdot 10^{-9}$ C. Rutuliukai buvo suliesti, paskui vėl atitolinti tuo pačiu atstumu. Apskaičiuokite:

a) rutuliukų elektrostatinės sąveikos jėgą iki sulietimo; ($1{,}2 \cdot 10^{-6}$ N)

b) rutuliukų elektrostatinės sąveikos jėgą po sulietimo. ($1{,}3 \cdot 10^{-6}$ N)

8. Du rutuliukai, nutolę vienas nuo kito 20 cm, turi vienodą neigiamąjį krūvį ir veikia vienas kitą 0,23 mN jėga. Apskaičiuokite elektronų perteklių kiekviename rutuliuke. ($2 \cdot 10^{11}$)

Pagrindinės sąvokos

Artìveikos teòrija, tolìveikos teòrija, elektrìnis laũkas, elektrostãtinis laũkas, elektrìnio laũko stìpris, elektrìnio laũko jėgų̃ lìnijos, vienalỹtis elektrìnis laũkas, superpozìcijos prìncipas.

14.3. Elektrinis laukas, jo stipris

Artiveika ir toliveika

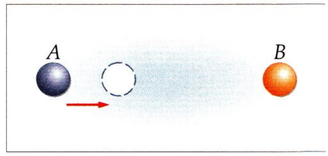
Kulono dėsnis rodo, kaip įelektrintų kūnų sąveikos jėga priklauso nuo tų kūnų krūvio ir atstumo tarp jų, tačiau neatskleidžia paties sąveikos proceso, nepaaiškina, kaip vienas kūnas veikia kitą. Kūnų sąveiką nagrinėja dvi teorijos: artiveikos ir toliveikos.

Toliveikos teorija teigia, kad įelektrinti kūnai jaučia vienas kitą be tarpinės aplinkos. Taigi šios teorijos esmę sudaro prielaida, kad nutolę vienas nuo kito kūnai sąveikauja betarpiškai per tuštumą. Poveikis perduodamas akimirksniu bet kokiu atstumu. Šią prielaidą paneigia *artiveikos teorija*. Anot jos, kūnų poveikį perduoda tarpinės grandys. Pavyzdžiui, pašnekovo burna ir balso stygos tiesiogiai neveikia kito pašnekovo ausų. Tarp pašnekovų yra tarpinė terpė – oras, kuriuo sklinda garsas. Artiveikos teorijos esmę sudaro prielaida, kad nutolę vienas nuo kito kūnai sąveikauja per tarpinę terpę, perduodančią sąveiką iš vieno taško į kitą. Įelektrintų kūnų sąveiką artiveikos teorija aiškina tuo, kad aplink kiekvieną kūną yra elektrinis laukas. Būtent jis yra tarpinė grandis, kuria perduodama sąveika. Elektrinis laukas yra materialus, erdvėje nenutrūksta ir veikia kitus įelektrintus kūnus.

Ištyrus judančių elektringųjų dalelių elektromagnetinę sąveiką, artiveikos teorija fizikos moksle įsitvirtino galutinai. Tai, kad elektrinis laukas objektyviai egzistuoja, įrodo bandymai su greitėjančiais įelektrintais kūnais. Pavyzdžiui, truputį pastūmus kūną A (14.3.1 pav.), jėga, veikianti kūną B, pakinta ne iš karto, o tik po tam tikro laiko tarpo

$$t = \frac{AB}{c}; \qquad (14.8)$$

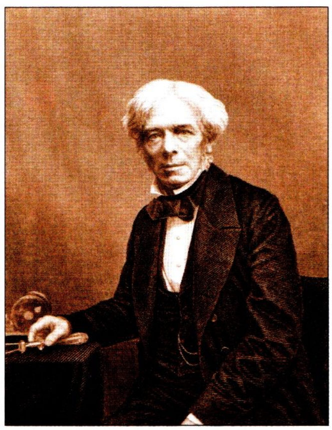
čia c – šviesos greitis tuštumoje (300 000 km/s). Erdvėje tarp kūnų vyksta procesas, dėl kurio sąveika plinta baigtiniu greičiu. Elektriniame lauke vykstančių kitimų vėlavimą nedideliais atstumais aptikti sunku, tačiau kosmose jis pastebimas lengvai. Pavyzdžiui, iš kosminių ryšių centro Žemėje pasiųstos komandos pasiekdavo mėnuleigio priėmimo antenas tik po 1,3 s.



14.3.1 pav.

Elektrinis laukas

Elektrinio lauko sąvoką apie 1834 m. pirmą kartą pavartojo anglų fizikas Maiklas Faradėjus. Jis iškėlė hipotezę, kad erdvėje aplink įelektrintus kūnus yra ypatingos formos materija. Šią žmogaus nejuntamą materiją Faradėjus pavadino *elektriniù laukù*. Elektrinis laukas yra materialus, egzistuoja nepriklausomai nuo mūsų, nuo mūsų žinių apie jį. Elektrinį lauką galima aptikti bandymais. Nejudančių įelektrintų kūnų sukurtas laukas vadinamas *elektrostãtiniu*[1].



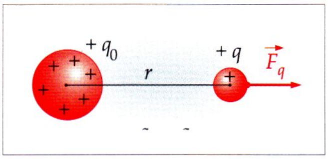
Maiklas Faradėjus

[1] Elektrostatinį lauką trumpumo dėlei toliau vadinsime tiesiog elektriniu lauku.

Svarbiausia elektrinio lauko savybė yra ta, kad įelektrintus kūnus jis veikia tam tikra jėga. Pagal tą poveikį aptinkamas laukas ir nustatomas jo pasiskirstymas erdvėje. Tolstant nuo kūno, elektrinis laukas silpnėja. Jis gali būti sukurtas tiek vakuume, tiek bet kurioje kitoje terpėje: vandenyje, žėrutyje, pliene ir pan.

Elektrinį lauką apibūdina du pagrindiniai dydžiai: ***elektrìnio laũko stìpris*** ir ***potenciãlas***. Aptarkime kiekvieną šių dydžių.

Elektrinio lauko stipris



14.3.2 pav.

Sakykime, elektrinį lauką erdvėje sukuria taškinio kūno elektros krūvis ($+q_0$; 14.3.2 pav.). Šį lauką konkrečiame erdvės taške galima apibūdinti jėga, kuria laukas veikia tame taške esantį kitą taškinį kūną. Dviejų įelektrintų kūnų sąveikos jėga

$$F = k\frac{|q_0|\cdot|q|}{r^2}. \tag{14.9}$$

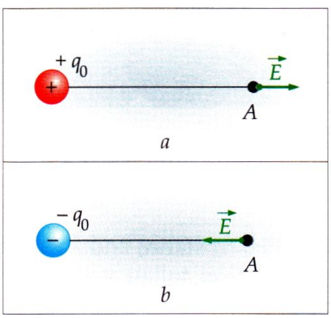
Iš (14.9) formulės matyti, kad ši jėga priklauso ne tik nuo krūvio $+q_0$, bet ir nuo patekusio į lauką kūno krūvio $+q$, todėl ja apibūdinti krūvio $+q_0$ sukurtą elektrinį lauką nėra tikslinga. Kulono jėgos (14.9) ir į lauką įnešto kūno krūvio $+q$ santykis nepriklauso nuo įnešto taškinio kūno krūvio. Šis santykis yra elektrinio lauko charakteristika, vadinama elektrinio lauko stipriu ir žymima raide $\vec{E}$. ***Elektrìnio laũko stìpris yra fizikinis dydis, lygus jėgos, kuria laukas veikia taškinį kūną, ir to kūno krūvio santykiui:***

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{|q|}. \tag{14.10}$$

Elektrinio lauko stipris yra jėginė lauko charakteristika. Kaip ir jėga, jis yra vektorinis dydis. Žinodami elektrinio lauko stiprį konkrečiame erdvės taške, galime rasti jėgą, kuria šis laukas veiks tame taške esantį įelektrintą kūną.

Pagal (14.10) formulę galima nustatyti elektrinio lauko stiprio matavimo vienetą SI sistemoje – *niùtoną kulònui* (N/C).

14.3.3 pav.



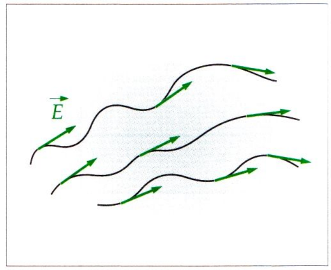
Elektrinio lauko stiprio vektorius $\vec{E}$ bet kuriame elektrinio lauko taške nukreiptas tiese, kuri jungia nagrinėjamą lauko tašką ir kūną. Jei $q_0 > 0$, elektrinio lauko stiprio vektorius nukreiptas nuo įelektrinto kūno (14.3.3 pav., *a*), jei $q_0 < 0$ – į kūną (14.3.3 pav., *b*).

Elektrinio lauko jėgų linijos

Elektrinį lauką galima pavaizduoti ***elektrìnio laũko jėgų̃***, arba stiprio, ***lìnijomis***. Elektrinio lauko jėgų linijos sąvoką pirmasis pavartojo taip pat Maiklas Faradėjus.

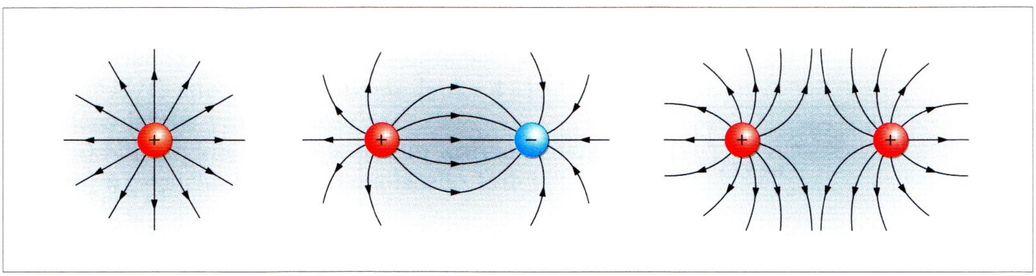
Nenutrūkstamos linijos, kurių liestinės kiekviename taške sutampa su elektrinio lauko stiprio vektoriumi, vadinamos to laũko jėgų̃ lìnijomis (14.3.4 pav.). Elektrinio lauko jėgų linijos prasideda teigiamąjį krūvį turinčiuose kūnuose ir baigiasi neigiamąjį krūvį turinčiuose kūnuose arba nueina į begalybę (14.3.5 pav.). Jos nėra uždaros, nenutrūksta ir nesikerta. Jų sankirta reikštų, kad tame taške elektrinio lauko stiprio kryptis neapibrėžta. Elektrinio lauko jėgų linijos padeda vaizdžiai perteikti elektrinio lauko išsidėstymą erdvėje, tačiau jos nėra realiai egzistuojantys dariniai.

Atliekant bandymus, elektrinio lauko jėgų linijas galima padaryti „matomas". Reikia pailgus kristalėlius (pavyzdžiui, chinino) išmaišyti klampiame skystyje (kaip antai aliejuje) ir į jį įdėti įelektrintus kūnus. Kristalėliai išsidėstys išilgai elektrinio lauko jėgų linijų (14.3.6 pav.).

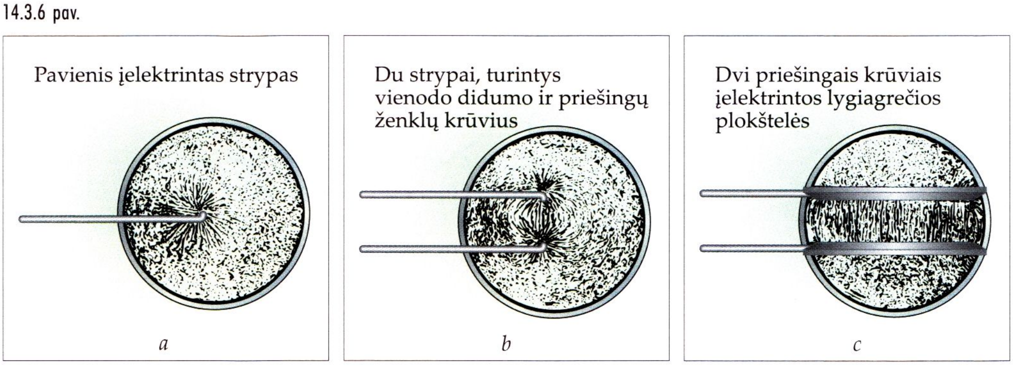


14.3.4 pav.

14.3.5 pav.



14.3.6 pav.



Linijų tankis rodys elektrinio lauko stiprį. Kuo tankiau išsidėstys elektrinio lauko jėgų linijos, tuo stipresnis laukas bus tose erdvės dalyse. Tarp lygiagrečių plokštelių elektrinio lauko jėgų linijos išsidėsto lygiagrečiai, vienodais atstumais viena nuo kitos (14.3.6 pav., *c*). Tai rodo, kad elektrinio lauko stipris visuose taškuose yra vienodas. Elektrinis laukas, kurio stipris visuose erdvės taškuose yra vienodas, vadinamas ***vienalyčiu***. Kai lauko stipris ribotoje erdvės dalyje mažai kinta, elektrinį lauką joje galima laikyti vienalyčiu.

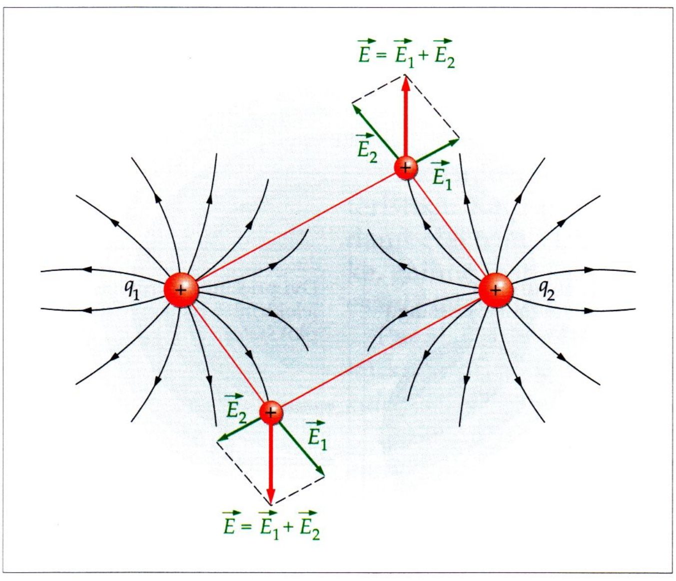
Elektrinių laukų superpozicijos principas

Jei tiriamajame erdvės taške skirtingi įelektrinti kūnai sukuria elektrinius laukus, kurių stipris $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$ ir t. t., tai atstojamojo elektrinio lauko stipris $\vec{E}$ lygus visų elektrinių laukų stiprių geometrinei sumai (14.3.7 pav.):

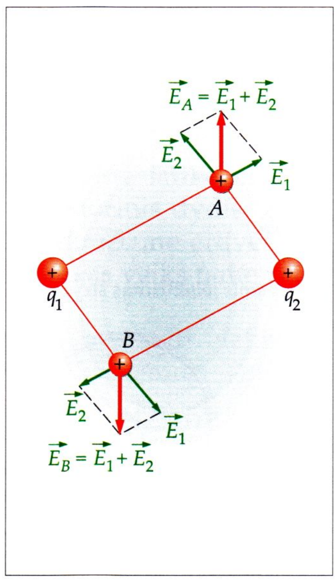
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots . \qquad (14.11)$$

Taigi elektriniams laukams būdingas superpozicijos principas. Sprendžiant uždavinius, tiriamajame erdvės taške pakanka pavaizduoti po vieną skirtingų krūvių sukurto elektrinio lauko jėgų liniją (14.3.8 pav.).

14.3.7 pav.



14.3.8 pav.



Klausimai ir užduotys

1. Kaip įelektrintų kūnų sąveiką aiškina:
a) artiveikos teorija;
b) toliveikos teorija?

2. Kokie du pagrindiniai dydžiai apibūdina elektrinį lauką?

3. Apibrėžkite elektrinio lauko stiprį. Nurodykite jo matavimo vienetą.

4. Ką vadiname elektrinio lauko jėgų linijomis?

5. Kur prasideda ir kur baigiasi elektrinio lauko jėgų linijos? Kodėl jos negali kirstis?

6. 14.3.9 paveiksle pavaizduota keletas elektrinių laukų. Kurie iš jų yra vienalyčiai, kurie – nevienalyčiai? Atsakymą pagrįskite.

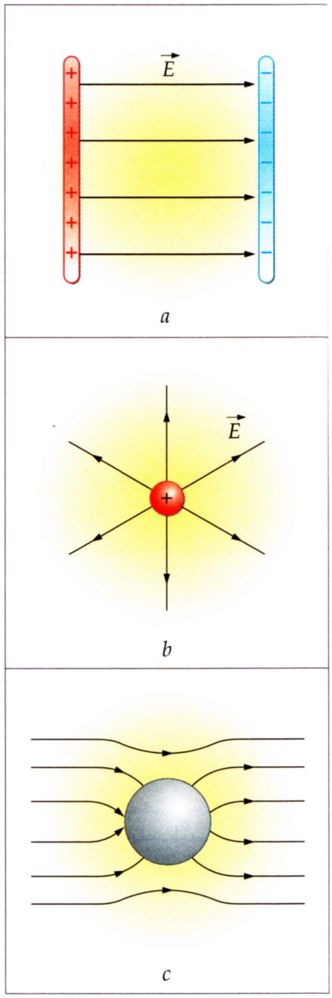
7. Elektrinio lauko stipris taške *A* nukreiptas į šiaurę, o jo modulis lygus $4 \cdot 10^5$ N/C.
a) Apskaičiuokite jėgą, kuria taške *A* elektrinis laukas veiks elektroną. ($6{,}4 \cdot 10^{-19}$ N)
b) Nurodykite, kuria kryptimi elektrinis laukas veiks tą elektroną.

8. Atsižvelgdami į tai, kad protono krūvis lygus $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, apskaičiuokite:
a) elektrinio lauko stiprį $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m atstumu nuo protono; ($5{,}13 \cdot 10^{11}$ N/C)
b) jėgą, kuria šiame taške elektrinis laukas veiks elektroną. ($8{,}2 \cdot 10^{-8}$ N)

9. Vertikaliai aukštyn nukreiptame vienalyčiame $2{,}6 \cdot 10^5$ N/C stiprio elektriniame lauke $4 \cdot 10^{-9}$ g masės vandens lašelis yra pusiausviras.
a) Nustatykite vandens lašelio krūvio ženklą.
b) Apskaičiuokite vandens lašelio krūvį. ($1{,}5 \cdot 10^{-16}$ C)
c) Apskaičiuokite elektronų perteklių lašelyje. (≈938 elektronai)

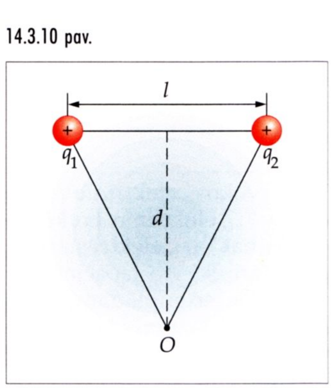
10. Kai elektrinio lauko stipris lygus $3 \cdot 10^6$ N/C, ore gali įvykti elektros išlydis. Koks turėtų būti metalinio rutulio spindulys, kad jame išsilaikytų 10^{-6} C krūvis? (5,50 m)

11. Du taškiniai kūnai, kurių krūvis $q_1 = 10^{-8}$ C ir $q_2 = -10^{-8}$ C, nutolę vienas nuo kito atstumu $l = 5$ cm (14.3.10 pav.). Apskaičiuokite elektrinio lauko stiprį taške *O*, kai $d = 50$ cm. (36,2 N/C)



14.3.9 pav.

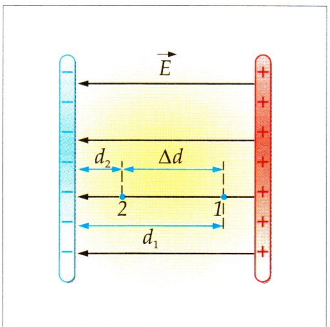
14.3.10 pav.



14.4. Elektrinio lauko darbas. Potencialas. Įtampa

Pagrindinės sąvokos

Elektrìnio laũko dárbas[1],
potenciãlinis laũkas,
potenciãlas,
potenciãlų skìrtumas,
įtampa.



14.4.1 pav.

Darbas perkeliant įelektrintą kūną elektriniame lauke

„Mechanikos" skyriuje vartoti fizikiniai dydžiai (poslinkis, jėga, jėgos atliekamas darbas, potencinė energija) tinka bet kuriai sąveikai, taip pat ir elektromagnetinei, apibūdinti.

Apskaičiuokime darbą, kurį atlieka elektrostatinė jėga, perkeldama taškinį teigiamai įelektrintą kūną[2] vienalyčiame elektriniame lauke iš *1* taško į *2* tašką (14.4.1 pav.). Kadangi krūvis perkeliamas išilgai lauko jėgų linijos atstumu $\Delta d = d_1 - d_2$, tai darbas

$$A = F\Delta d = qE(d_1 - d_2). \qquad (14.12)$$

Pertvarkę gauname naują elektrinio lauko jėgų darbo išraišką:

$$A = -(qEd_2 - qEd_1). \qquad (14.13)$$

Remdamiesi elektrostatinės jėgos ir gravitacijos jėgos panašumu (abi šios jėgos yra atvirkščiai proporcingos atstumo kvadratui, nukreiptos išilgai tiesės, jungiančios kūnus), galime daryti prielaidą, kad darbas, kurį atlieka elektrostatinės sąveikos jėgos, perkeldamos krūvį iš vieno lauko taško į kitą, nepriklauso nuo krūvio judėjimo trajektorijos (14.4.2 pav.). Šią prielaidą patvirtina bandymai. Jeigu jėgos atliekamas darbas nepriklauso nuo krūvio trajektorijos formos, tai uždara trajektorija jis lygus nuliui. Vadinasi, elektrinio lauko, kaip ir gravitacijos lauko, jėgų darbas uždara trajektorija lygus nuliui. Laukas, kurio jėgų darbas uždara trajektorija lygus nuliui, vadinamas ***potenciãliniu***.

Jeigu darbas nepriklauso nuo krūvio judėjimo trajektorijos formos, tai jis lygus potencinės energijos pokyčiui su priešingu ženklu. Vadinasi, elektrinio lauko darbas taip pat lygus potencinės energijos pokyčiui:

$$A = -(W_2 - W_1). \qquad (14.14)$$

[1] Sąvokos „elektrinio lauko darbas", „elektrinio lauko jėgų darbas" ir „elektrostatinių jėgų darbas" yra tapačios.

[2] Toliau trumpindami vietoj sąvokos „taškinis įelektrintas kūnas" vartosime sąvoką „krūvis".

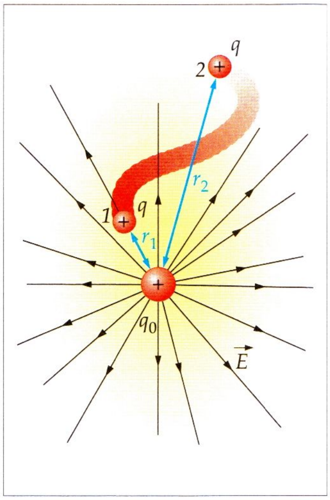
Iš (14.13) ir (14.14) formulės matyti, kad vienalyčiame elektriniame lauke atstumu d nuo įelektrintos plokštės esančio krūvio potencinė energija išreiškiama taip:

$$W = qEd. \qquad (14.15)$$

Gravitacijos lauke esančio masės m kūno potencinė energija proporcinga jo masei, o elektriniame lauke esančio krūvio potencinė energija – krūviui. Tiek kūno, esančio gravitacijos lauke (14.4.3 pav., *a*), tiek krūvio elektriniame lauke (14.4.3 pav., *b*) potencinė energija priklauso nuo pasirinkto nulinio lygio.

Krūvio potencinė energija tiriamajame elektrinio lauko taške dar priklauso nuo krūvio ženklo: kai krūvis neigiamas, ji neigiama, kai teigiamas – teigiama.

Fizikinę prasmę turi ne pati potencinė krūvio energija, bet jos verčių skirtumas, kurį apibūdina elektrinio lauko darbas, atliekamas perkeliant krūvį iš vienos padėties į kitą.



14.4.2 pav.

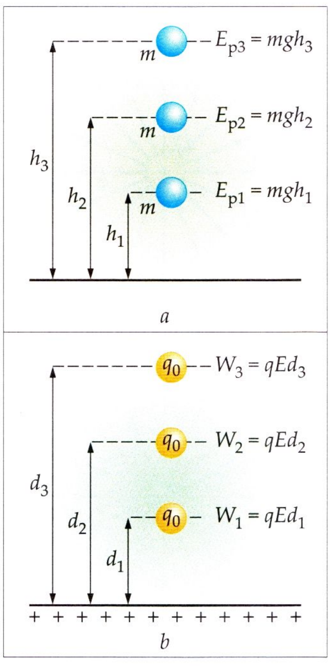
Potencialas

Skirtingi krūviai tame pačiame elektrinio lauko taške įgyja nevienodai potencinės energijos. Tačiau kiekvieno krūvio potencinės energijos ir krūvio santykis yra pastovus dydis ir nepriklauso nuo krūvio. Vadinasi, jis gali būti elektrinio lauko charakteristika. ***Fizikinis dydis, lygus elektriniame lauke esančio krūvio potencinės energijos ir krūvio santykiui, vadinamas elektrìnio laũko potencialù.*** Potencialas paprastai žymimas raide φ (graikų abėcėlės raide, tariama „fi“). Taigi

$$\varphi = \frac{W}{q} = Ed. \qquad (14.16)$$

Elektrinio lauko potencialas – skaliarinis dydis. Jis yra energinė lauko charakteristika. Žinant elektrinio lauko potencialą konkrečiame taške, galima nustatyti, kiek potencinės energijos įgis krūvis, patekęs į tą lauko tašką.

14.4.3 pav.

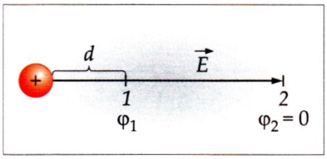


Potencialų skirtumas

Išsiaiškinome, kad, perkeldamos krūvį q, elektrinio lauko jėgos atlieka darbą, kuris lygus to krūvio potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu.

Atsižvelgdami į potencialo apibrėžimą (14.16), elektrinio lauko darbą galime išreikšti taip:

$$A = -(W_2 - W_1) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = -q\Delta\varphi. \quad (14.17)$$



14.4.4 pav.

Vietoj potencialo pokyčio $\Delta\varphi$, išreiškiančio potencialo verčių galiniame bei pradiniame trajektorijos taške skirtumą, fizikoje dažniau vartojamas kitas dydis, vadinamas ***potenciãlų skir̃tumu***. Jis lygus potencialo verčių pradiniame ir galiniame trajektorijos taške skirtumui $\varphi_1 - \varphi_2$. Potencialų skirtumas dažnai dar vadinamas ***į́tampa*** ir žymimas U:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi. \quad (14.18)$$

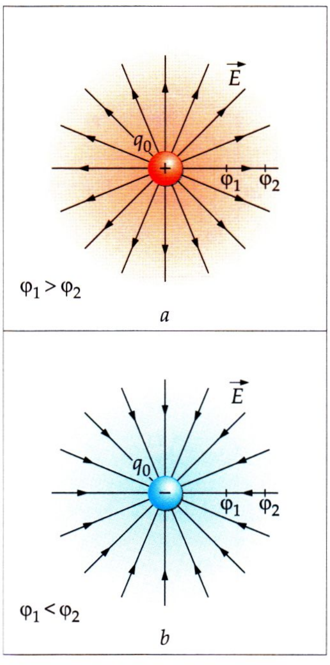
Remdamiesi (14.17) ir (14.18) formule, įtampą galime išreikšti taip:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (14.19)$$

Dviejų taškų potencialų skirtumas (įtampa) lygus elektrinio lauko darbo, kuris atliekamas perkeliant teigiamąjį krūvį iš pradinio taško į galinį, ir to krūvio santykiui. Potencialų skirtumo vienetas nustatomas pagal (14.19) formulę, atsižvelgiant į darbo ir krūvio matavimo vienetus. Potencialų skirtumo matavimo vienetas vadinamas *vòltu* (V):

$$1\,\mathrm{V} = \frac{1\,\mathrm{J}}{1\,\mathrm{C}}. \quad (14.20)$$

14.4.5 pav.



Dviejų taškų potencialų skirtumas lygus vienetui, kai, perkeldamas 1 C krūvį iš vieno taško į kitą, elektrinis laukas atlieka 1 J darbą.

Iš (14.19) formulės išplaukia nauja fizikinė potencialo prasmė. Labai toli nuo krūvio esančių taškų potencialas lygus nuliui ($\varphi_2 = 0$). Vadinasi, elektrinio lauko potencialo skaitinė vertė atstumu r nuo krūvio (14.4.4 pav.) lygi darbui, kurį laukas atlieka perkeldamas vienetinį teigiamąjį krūvį iš tam tikro erdvės taško į be galo nutolusį tašką.

Teigiamąjį krūvį perkeldamas vektoriaus $\vec{E}$ kryptimi, elektrinis laukas atlieka teigiamą darbą, todėl potencialas φ_1 yra didesnis už potencialą φ_2 (14.19). Iš čia išplaukia, kad elektrinio lauko stipris nukreiptas potencialo mažėjimo linkme (14.4.5 pav.).

Pagrindinių elektrinio lauko charakteristikų ryšys

Remiantis elektrinio lauko atliekamo darbo ir įtampos formulėmis (14.13) ir (14.19), nesunku susieti pagrindines to lauko charakteristikas (elektrinio lauko stiprį ir potencialų skirtumą):

$$E = \frac{U}{\Delta d}. \qquad (14.21)$$

(14.21) formulė rodo: kuo mažiau kinta potencialas, tuo mažesnis elektrinio lauko stipris. Kai potencialas visai nekinta ($U = 0$), elektrinio lauko stipris lygus nuliui. Iš gautos formulės išplaukia dar vienas elektrinio lauko stiprio matavimo vienetas:

$$[E] = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}. \qquad (14.22)$$

Taigi elektrinio lauko stiprį SI sistemoje galima matuoti *vòltais mètrui* (V/m). Elektrinio lauko stipris lygus 1 V/m, kai dviejų vienalyčio lauko taškų, nutolusių vienas nuo kito 1 m atstumu, potencialų skirtumas lygus 1 V. Būtent 1 V/m yra pagrindinis elektrinio lauko stiprio matavimo vienetas.

Klausimai ir užduotys

1. Kaip taškinio įelektrinto kūno potencinės energijos pokytis susijęs su elektrinio lauko jėgų darbu?

2. Apibrėžkite potencialą, nurodykite jo matavimo vienetą.

3. Kaip elektrinio lauko stipris susijęs su įtampa? Įrodykite, kad $E = \frac{U}{\Delta d}$.

4. Įrodykite, kad elektrinio lauko stiprio matavimo vienetai 1 N/C ir 1 V/m yra lygūs.

5. Pagrįskite teiginį: taškuose, vienodai nutolusiuose nuo elektringosios dalelės, elektrinio lauko potencialas yra vienodas.

6. Elektrinio lauko potencialas mažėja iš apačios į viršų. Į kur nukreiptas elektrinio lauko stiprio vektorius?

7. Taškų, išsidėsčiusių vienoje jėgų linijoje 2 cm atstumu vienas nuo kito, potencialų skirtumas lygus 220 V. Apskaičiuokite vienalyčio elektrinio lauko stiprį.

(11 kV/m)

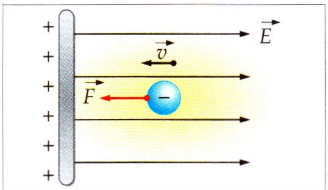
8. Vienalyčio elektrinio lauko stipris 2 kV/m. Šio lauko jėgų linijų kryptimi 3 cm atstumu buvo perkelta dalelė, kurios krūvis 20 nC. Apskaičiuokite:

a) elektrinio lauko atliktą darbą; $(1{,}2 \cdot 10^{-6}$ J)

b) elektrinio lauko ir dalelės sąveikos potencinės energijos pokytį; $(-1{,}2 \cdot 10^{-6}$ J)

c) įtampą tarp dalelės trajektorijos pradinio ir galinio taško. (60 V)

9. Du taškiniai įelektrinti kūnai, kurių krūviai $q_1 = 6 \cdot 10^{-8}$ C ir $q_2 = 1{,}5 \cdot 10^{-9}$ C, nutolę vienas nuo kito atstumu $r_1 = 20$ cm. Kokį darbą atlieka elektrinės jėgos, atitraukdamos kūnus vieną nuo kito 50 cm atstumu? $(2{,}43 \cdot 10^{-6}$ J)



14.4.6 pav.

10. Kokį greitį įgyja elektronas, pagreitintas 200 V potencialų skirtumo (14.4.6 pav.)? $(8{,}4 \cdot 10^{6}$ m/s)

11. 1 g masės rutuliukas juda iš taško L, kurio potencialas $\varphi_1 = 600$ V, į tašką M, kurio potencialas lygus nuliui. Taške M rutuliuko greitis 20 cm/s. Rutuliuko krūvis 10^{-8} C.

a) Nubraižykite aiškinamąjį brėžinį.

b) Apskaičiuokite rutuliuko greitį taške L. (17 cm/s)

14.5. Laidininkai ir dielektrikai elektriniame lauke

Pagrindinės sąvokos

Laĩdininkas, dielèktrikas, krū̃vininkai, dielektrìnė skvarbà, dielèktriko poliarizãcija.

Elektringųjų dalelių tarpusavio sąveika priklauso nuo terpės, kurioje yra dalelės. Bet kurioje medžiagoje ši sąveika yra visuomet silpnesnė negu vakuume, mat medžiaga susilpnina elektrinį lauką. Nuo medžiagos elektrinių savybių priklauso, kiek joje sumažėja elektrinio lauko stipris. Pagal elektrines savybes visos medžiagos skirstomos į laidininkus, dielektrikus ir puslaidininkius. Čia nagrinėsime tik laidininkus ir dielektrikus.

Laidininkai elektriniame lauke

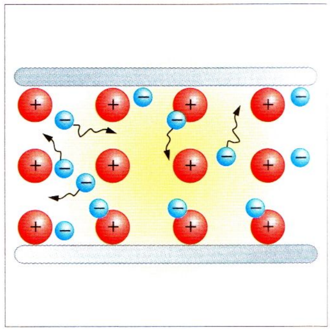
Laĩdininkais vadiname medžiagas, turinčias laisvųjų elektringųjų dalelių, arba ***krū̃vininkų***. Veikiamos elektrinio lauko, jos gali laisvai judėti laidininkų vi-

duje. Geriausi laidininkai yra metalai. Prie laidininkų taip pat priskiriami elektrolitų tirpalai, drėgnas oras, plazma, žmogaus kūnas, žemė ir kt.

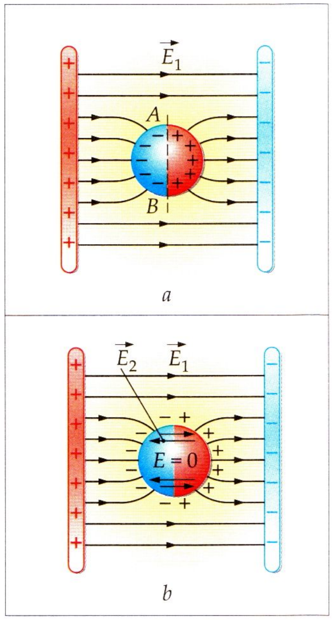
Metaluose teigiamuosius jonus supa laisvieji elektronai (14.5.1 pav.). Kai išorinio elektrinio lauko nėra, laisvieji elektronai juda metalu netvarkingai, t. y. įvairiomis kryptimis. Elektronų šiluminio judėjimo intensyvumas priklauso nuo temperatūros. Laidininko viduje elektrinio lauko nėra, nes elektronų ir jonų sukurti elektriniai laukai kompensuoja vieni kitus.

Kai laidininkas atsiduria stiprio $\vec{E}_1$ elektriniame lauke, juo ima tekėti trumpalaikė elektros srovė. Laisvieji laidininko elektronai juda teigiamai įelektrintos plokštės link. Kita laidininko dalis įsielektrina teigiamai (14.5.2 pav., *a*). Taip priešingose laidininko pusėse susikaupia skirtingo ženklo krūvį turinčios elektringosios dalelės. Jeigu linija *AB* padalytume laidininką pusiau, abi jo pusės būtų įelektrintos. Persiskirsčiusios elektringosios dalelės sukuria savo lauką $\vec{E}_2$, kuris kompensuoja išorinį elektrinį lauką $\vec{E}_1$. Atstojamasis lauko stipris laidininke pasidaro lygus nuliui ($E = 0$), o elektringosios dalelės nustoja judėti (14.5.2 pav., *b*).

Laidininko viduje elektrinio lauko nėra (14.5.3 pav.). Šiuo reiškiniu pagrįsta elektrostatinė sauga – elektriniam laukui jautrių prietaisų saugojimas metalinėse dėžėse.



14.5.1 pav.



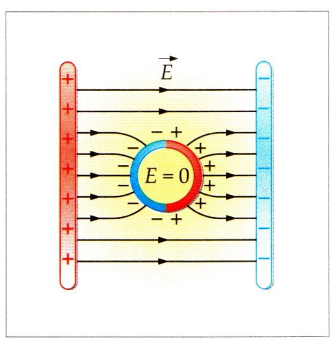
14.5.2 pav.

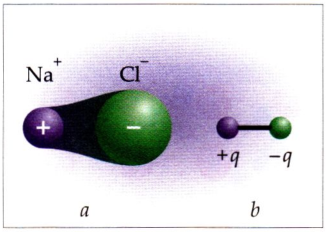
Dielektrikai ir jų rūšys

Dielèktrikus sudaro neutralūs atomai arba molekulės. Juose laisvųjų elektringųjų dalelių nėra, todėl krūvį turinčios dalelės, veikiamos elektrinio lauko, negali judėti visoje medžiagoje. Prie dielektrikų priskiriamos dujos, kai kurie skysčiai (distiliuotas vanduo, benzolas, aliejus ir kt.) bei kietieji kūnai (stiklas, porcelianas, medis ir kt.).

Per chemijos pamokas sužinojote, kad molekulės gali būti nepōlinės ir pōlinės. Pagal tai ir dielektrikai skirstomi į nepolinius ir polinius. Nepolinius dielektrikus sudaro nepolinės molekulės, kaip antai vandenilio (H_2), azoto (N_2) ir deguonies (O_2). Jų neigiamojo krūvio pasiskirstymo centras yra atomo viduryje ir sutampa su teigiamąjį krūvį turinčiu branduoliu.

14.5.3 pav.





14.5.4 pav.

Poliniai dielektrikai sudaryti iš polinių molekulių. Jų teigiamojo ir neigiamojo krūvio pasiskirstymo centrai nesutampa. Pavyzdžiui, buityje vartojamos valgomosios druskos (NaCl) molekulės teigiamasis krūvis susitelkia natrio jone, o neigiamasis – chloro jone (14.5.4 pav., *a*). Susidarant NaCl molekulei, valentinį natrio elektroną pasiima chloras. Polines molekules galima laikyti elektriniais dipòliais (14.5.4 pav., *b*).

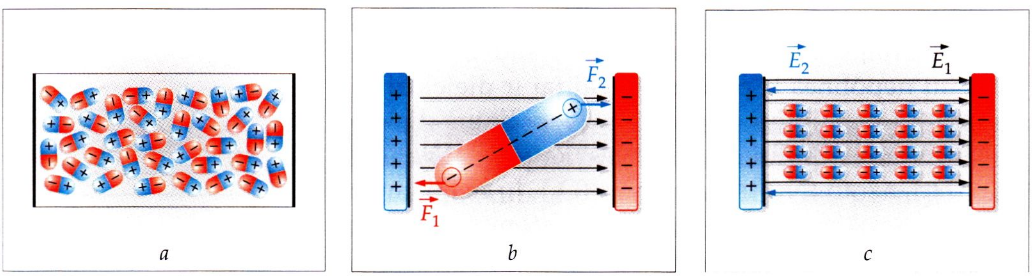
Poliniai dielektrikai elektriniame lauke

Dėl šiluminio judėjimo dipoliai dielektrike yra orientuoti netvarkingai (14.5.5 pav., *a*) ir elektros krūvis dielektrike vidutiniškai lygus nuliui. Elektrinio lauko stipris jame taip pat lygus nuliui.

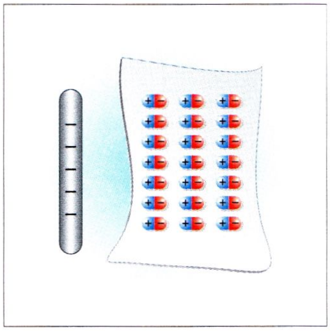
Padėkime tokį dielektriką stiprio $\vec{E}_1$ elektriniame lauke, kurį sukuria dvi įelektrintos plokštės. Kiekvieną dipolį ims veikti vienodo modulio, bet priešingų krypčių jėgos (14.5.5 pav., *b*). Jos sukurs jėgų momentą, kuris stengsis dipolį pasukti taip, kad jo ašis būtų nukreipta išilgai elektrinio lauko jėgų linijų. Veikiamos jėgų momento, teigiamosios elektringosios dalelės pasislinks lauko kryptimi, o neigiamosios – priešinga kryptimi. Šis reiškinys vadinamas ***dielèktriko poliarizãcija***. Dipoliai išsirikiuos tvarkingai, neigiamaisiais poliais atsigręždami į teigiamai įelektrintą plokštę, o teigiamaisiais – į neigiamai įelektrintą plokštę (141.5.5 pav., *c*). Šios nekompensuotos dalelės sukurs savo elektrinį lauką, kurio stipris $\vec{E}_2$ bus nukreiptas prieš išorinio elektrinio lauko stiprį $\vec{E}_1$. Dėl to laukas $\vec{E}$ dielektrike susilpnės.

Dipolio pasisukimu elektriniame lauke galima paaiškinti, kodėl įelektrintas kūnas pritraukia lengvas

14.5.5 pav.



popieriaus skiauteles (14.5.6 pav.). Toks kūnas aplink save sukuria elektrinį lauką. Dėl jo poveikio priešingose popieriaus skiautelės pusėse atsiranda elektringųjų dalelių, turinčių nevienodo ženklo krūvį. Arčiau įelektrinto kūno esančiose popieriaus skiautelės pusėse atsiranda elektros krūvis, kurio ženklas priešingas įelektrinto kūno krūviui. Dėl to popieriaus skiautelės pritraukiamos prie kūno.



14.5.6 pav.

Elektrinio lauko susilpnėjimas dielektrike priklauso nuo dielektriko savybių. Jas apibūdina ***dielektrìnė skvarbà*** (žymima ε). ***Dielektrine skvarba vadinamas fizikinis dydis, rodantis, kiek kartų elektrinio lauko stipris E vienalyčiame dielektrike yra mažesnis už to lauko stiprį E_0 vakuume:***

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}. \tag{14.23}$$

Vadinasi, elektrinio lauko stipris dielektrike sumažėja ε kartų, palyginti su vakuumu. Pavyzdžiui, žėručio dielektrinė skvarba lygi 6. Tai rodo, kad elektrinis laukas žėrutyje yra 6 kartus silpnesnis negu vakuume. Susilpnėjus elektriniam laukui, tiek pat kartų dielektrike susilpnėja ir taškinių kūnų sąveikos jėga:

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2}. \tag{14.24}$$

Labai stiprus išorinis elektrinis laukas gali nutraukti ryšius tarp dielektriko elektringųjų dalelių. Tada dielektrike atsiranda laisvųjų krūvininkų. Toks reiškinys vadinamas dielektriko pramušimu. Dielektrikas dėl to netenka izoliacinių savybių ir neatitinka savo paskirties.

Klausimai ir užduotys

1. Kokias medžiagas vadiname laidininkais; dielektrikais? Pateikite jų pavyzdžių.

2. Paaiškinkite, kodėl elektrinio lauko stipris laidininke lygus nuliui.

3. Paaiškinkite, kodėl elektrinis laukas dielektrike susilpnėja.

4. Kokia yra dielektrinės skvarbos fizikinė prasmė?

5. Aliumininis indas pripiltas vandens ir įneštas į 81 kV/m stiprio vienalytį elektrinį lauką. Apskaičiuokite lauko stiprį indo sienelėse ir vandenyje.

6. Du įelektrinti rutuliai vakuume veikia vienas kitą 81 mN jėga. Kaip pakis ši elektrostatinės sąveikos jėga, kai rutulius įmesime į vandenį? Atsakymą pagrįskite.

7. Skystame dielektrike yra 8 nC krūvį turintis kūnas. Elektrinio lauko stipris 3 cm atstumu nuo to kūno lygus 40 kV/m. Apskaičiuokite dielektriko dielektrinę skvarbą. (2)

14.6. Elektrinė talpa. Kondensatoriai

Pagrindinės sąvokos

Elektrìnė talpà,
farãdas,
kondensãtorius,
dviejų̃ laĩdininkų
elektrìnė talpà.

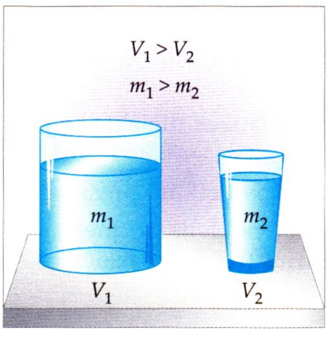
Elektrinė talpa

Nagrinėsime elektrotechnikoje svarbų klausimą: kaip laidininkuose galima sukaupti didelį elektros krūvį? Susipažinsime su fizikiniu dydžiu, apibūdinančiu laidininkų savybę kaupti elektros krūvį. Tas dydis vadinamas elektrinè talpà.

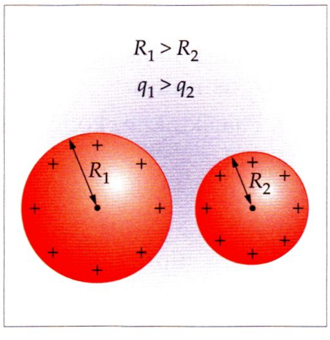
Norėdami geriau suvokti elektrinės talpos fizikinę prasmę, palyginkime elektrinius ir buitinius reiškinius. Sakykime, į du skirtingo tūrio indus ($V_1 > V_2$) įpilta vandens (14.6.1 pav.). Didesnio tūrio (kairiajame) inde telpa daugiau vandens, vadinasi, jame esančio vandens masė yra didesnė ($m_1 > m_2$). Akivaizdu, kad indo talpa nepriklauso nuo į jį įpilto skysčio masės.

Elektrostatikoje skysčio masei analogiškas dydis yra krūvis. Tarkime, kad įelektrinami du laidūs rutuliai, kurių spinduliai R_1 ir R_2 (14.6.2 pav.). Elektros krūvis

14.6.1 pav.



14.6.2 pav.



pasiskirsto rutulių paviršiuje. Kuo didesnis rutulys, tuo didesnis jo paviršiaus plotas, taigi tuo didesnį elektros krūvį jis gali sukaupti ($q_1 > q_2$). Laidaus rutulio elektrinė talpa nepriklauso nuo jam suteikto krūvio ir yra geometrinė rutulio charakteristika. Fizikinis dydis, nusakantis šią laidininko charakteristiką, vadinamas ***laĩdininko elektrinė̀ talpà*** ir žymimas raide C.

Dar kartą grįžkime prie elektrinių ir buitinių reiškinių palyginimo. Žinome, kad į stiklinę negalima įpilti daugiau vandens, negu joje telpa. Jei vandens tūris didesnis už indo tūrį, vanduo iš indo išsilieja. Tai būdinga ir elektriniams reiškiniams: kuo didesnė laidininko elektrinė talpa, tuo didesnį elektros krūvį jis gali sukaupti. Mažame rutulyje didelis elektros krūvis nesusikaupia, nes jėgos išstumia jį iš rutulio paviršiaus.

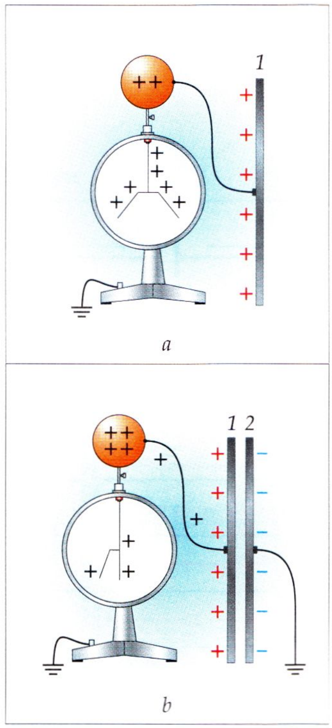
Laidininko elektrinė talpa priklauso nuo laidininko paviršiaus ploto, bet nepriklauso nuo to, ar laidininkas yra tuščiaviduris, ar pilnaviduris (mat visas krūvis susikaupia laidininko paviršiuje). Bandymai rodo, kad elektrinė talpa nepriklauso nuo laidininko medžiagos, tačiau priklauso nuo arti esančių kitų laidininkų bei jį supančios aplinkos.

Kondensatoriai

Arti laidininko esantis kitas laidininkas jo talpą padidina. Dviejų laidininkų sistema, naudojama elektros krūviui kaupti, vadinama ***kondensãtoriumi***. Kondensatorių sudaro du laidininkai, perskirti dielektriko sluoksniu, kurio storis mažas, palyginti su laidininko matmenimis. Kondensatorių sudarantys laidininkai vadinami elektròdais.

Išsiaiškinkime, kaip, sudarius dviejų laidininkų sistemą, padidėja elektrinė talpa. Prie elektroskopo pritvirtinkime teigiamai įelektrintą plokštelę *1* (14.6.3 pav., *a*), o prie jos priartinkime neigiamai įelektrintą įžemintą plokštelę *2* (14.6.3 pav., *b*). Neigiamas antrosios plokštelės krūvis pritraukia papildomą elektros krūvį iš elektroskopo į teigiamai įelektrintą plokštelę. Taip papildomas laidininkas (antroji plokštelė) padidina sistemos galimybes sukaupti elektros krūvį. Kondensatoriaus savybę kaupti elektros krūvį apibūdina kondensatoriaus elektrinė talpa.

14.6.3 pav.



Dviejų laidininkų elektrinė talpa vadinamas vieno laidininko krūvio ir potencialų skirtumo tarp to laidininko ir gretimo laidininko santykis:

$$C = \frac{q}{U}. \qquad (14.25)$$

Taigi kondensatoriaus krūvis lygus vieno elektrodo krūvio moduliui.

Elektrinės talpos C matavimo vienetą galima sužinoti remiantis (14.25) formule. Dviejų laidininkų elektrinė talpa lygi vienetui, jeigu, suteikus jiems +1 C ir –1 C elektros krūvius, tarp laidininkų susidaro 1 V potencialų skirtumas. Šis matavimo vienetas, pagerbiant anglų fiziką Maiklą Faradėjų, vadinamas ***faradù*** ir žymimas raide F:

$$[C] = 1\,\text{F} = 1\,\text{C/V}. \qquad (14.26)$$

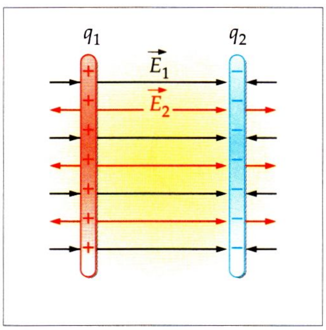
1 F – labai didelė elektrinė talpa. Praktikoje vartojami gerokai mažesni vienetai: *mikrofarãdas* (μF), *nanofarãdas* (nF) ir *pikofarãdas* (pF):

$$1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\ \text{F};\ 1\ \text{nF} = 10^{-9}\ \text{F};\ 1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}.$$

Žemės rutulio elektrinė talpa labai didelė. Ji lygi 0,7 μF. Dėl to, sujungus laidininką su Žeme (įžeminus), visas jo elektros krūvis nuteka į Žemę.

Plokščiojo kondensatoriaus plokštėms (elektrodams) suteikus vienodo modulio, bet priešingų ženklų krūvius, elektrinio lauko stipris tarp plokščių bus du kartus didesnis negu vienos plokštės sukurto elektrinio lauko stipris (14.6.4 pav.). Plokščių išorėje jis lygus nuliui, nes čia abiejų plokščių krūvininkai sukuria elektrinius laukus, kurie vienas kitą kompensuoja (stiprio moduliai yra lygūs, o kryptys – priešingos). Aplinkos elektrinis laukas į kondensatorių beveik neprasiskverbia, todėl jo elektrinė talpa nepriklauso nuo kitų arti esančių kūnų.

14.6.4 pav.



Plokščiojo kondensatoriaus elektrinė talpa

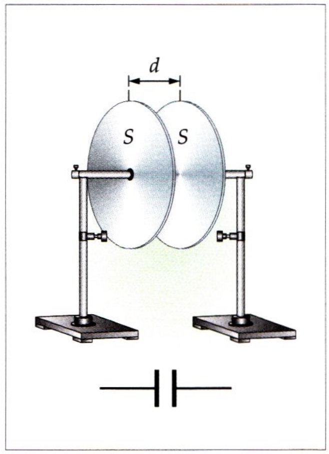
Bandymai rodo, kad plokščiojo kondensatoriaus (14.6.5 pav.) elektrinė talpa priklauso nuo šių veiksnių: bendro plokščių ploto S, atstumo d tarp plokščių, dielektriko, įterpto tarp plokščių, elektrinių savy-

bių. Šią priklausomybę galima gauti algebriniu būdu ir išreikšti formule

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}; \tag{14.27}$$

čia ε – dielektriko, esančio tarp kondensatoriaus plokščių, dielektrinė skvarba. Vadinasi, kondensatoriaus elektrinė talpa priklauso nuo dielektriko rūšies. Pavyzdžiui, tarp plokščių įkišus žėručio plokštelę, kondensatoriaus elektrinė talpa padidėja, nes žėručio dielektrinė skvarba ($\varepsilon_{žėr}$ = 6) didesnė negu oro (ε_{oro} = 1).

Iš (14.27) formulės matyti, kad, didinant kondensatoriaus plokščių plotą, elektrinė jo talpa didėja, o didinant atstumą tarp plokščių – mažėja.

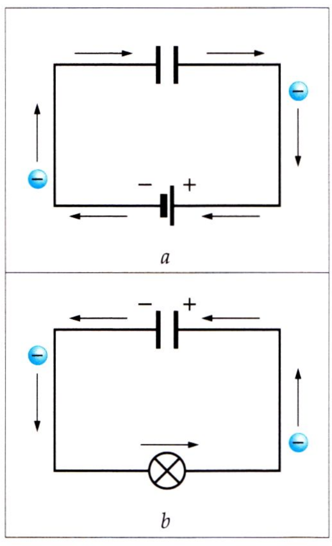


14.6.5 pav.

Įkrauto kondensatoriaus energija

Išnagrinėjome vieną kondensatoriaus įkrovimo būdą (14.6.3 pav.). Tačiau kondensatorių galima įkrauti ir kitaip. Tereikia jo elektrodus prijungti prie įtampos šaltinio polių (žr. 14.6.6 pav., *a*). Paskui prijungus jį prie elektros lempos, galima pastebėti trumpalaikį šviesos blyksnį. Tuo metu kondensatorius išsikrauna. Tai rodo, kad įkrautas kondensatorius turi energijos. Kondensatoriui išsikraunant, ji gali virsti mechanine, šviesos arba vidine energija. Kuo didesnė kondensatoriaus talpa ir įtampa, tuo daugiau energijos jis gali sukaupti.

14.6.6 pav.



Jei elektrinio lauko stipris kondensatoriaus viduje lygus E, tai vienos plokštės sukurto elektrinio lauko stipris bus $\frac{E}{2}$. Tada elektringosios dalelės potencinę energiją šiame lauke galėsime išreikšti formule

$$W = q\frac{E}{2}d. \tag{14.28}$$

Atsižvelgę į elektrinio lauko stiprio ir potencialų skirtumo ryšį ($U = Ed$), gausime:

$$W = \frac{qU}{2}. \tag{11.29}$$

Ši energija yra lygi darbui, kurį atliktų elektrinis laukas, suartindamas kondensatoriaus elektrodus

(plokštes). Pagal artiveikos teoriją visa įelektrintų kūnų sąveikos energija sutelkta tų kūnų elektriniame lauke. Vadinasi, kondensatoriaus energija sukaupta jo elektriniame lauke.

Klausimai ir užduotys

1. Kaip vadinama laidininkų savybė kaupti elektros krūvį?

2. Apibrėžkite vieno laidininko elektrinę talpą. Nuo ko ji priklauso?

3. Apibrėžkite dviejų laidininkų elektrinę talpą. Nurodykite, nuo ko priklauso plokščiojo kondensatoriaus elektrinė talpa.

4. Remdamiesi 14.6.6 paveikslu, atsakykite į tokius klausimus:

a) kaip vadinamas 14.6.6 paveiksle, *a*, pavaizduotas reiškinys; kiek laiko jis trunka;

b) kas atsitiktų, jei elektringoji dalelė tarp kondensatoriaus plokščių pradėtų judėti; kaip vadinamas toks reiškinys;

c) kaip pasikeistų situacija, jei kondensatorius būtų prijungtas prie kintamosios įtampos šaltinio;

d) kaip vadinamas 14.6.6 paveiksle, *b*, pavaizduotas reiškinys?

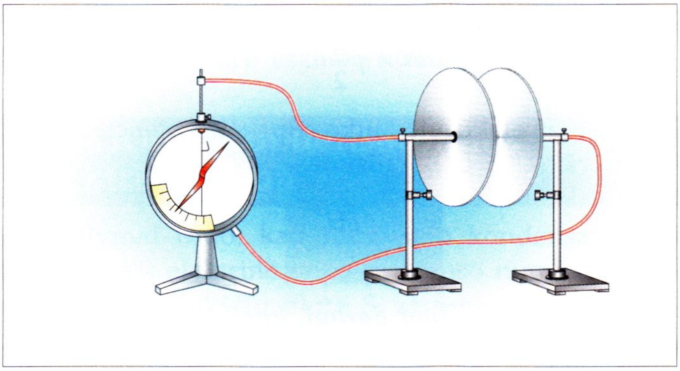
5. Kodėl elektrinės talpos sąvoka netaikoma dielektrikams?

6. Įrodykite, kad įkrauto kondensatoriaus energiją galima apskaičiuoti pagal formules

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \qquad (14.30)$$

7. 14.6.7 paveiksle pavaizduotas įkrautas kondensatorius, sujungtas su elektroskopu.

14.6.7 pav.



a) Kaip kis elektroskopo rodmenys, tolinant kondensatoriaus plokštes vieną nuo kitos? Atsakymą pagrįskite.
b) Kaip kis elektroskopo rodmenys, artinant kondensatoriaus plokštes vieną prie kitos? Atsakymą pagrįskite.

8. Įkrautas plokščiasis orinis kondensatorius atjungiamas nuo įtampos šaltinio ir panardinamas į alyvą. Kaip dėl to pakinta kondensatoriaus energija?

Mokomės spręsti uždavinius

1. Ant kondensatoriaus korpuso užrašyta: 150 μF, 200 V. Kokį didžiausią elektros krūvį gali sukaupti šis kondensatorius?

q – ?	$C = 150\ \mu F = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ F $U = 200$ V

Sprendimas

Iš kondensatoriaus elektrinės talpos formulės $C = \frac{q}{U}$ išreikškime elektros krūvį:

$$q = CU.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$q = 1{,}5 \cdot 10^{-4}\ \text{F} \cdot 200\ \text{V} = 3 \cdot 10^{-2}\ \text{C}.$$

Atsakymas: $3 \cdot 10^{-2}$ C.

2. Atstumas tarp orinio kondensatoriaus plokščių lygus 1 mm.

a) Koks turėtų būti plokščių plotas, kad kondensatoriaus talpa būtų lygi 1 pF; 1 F?
b) Koks būtų 1 pF talpos kondensatoriaus plokščių plotas, jei tarpas tarp jų būtų pripildytas dielektriko, kurio dielektrinė skvarba 7?

S_1 – ? S_2 – ? S_3 – ?	$d = 1$ mm $= 10^{-3}$ m $C_1 = 1$ pF $= 10^{-12}$ F $C_2 = 1$ F $\varepsilon = 1$ $\varepsilon_1 = 7$ $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ C^2/(N \cdot m^2)$

Sprendimas

a) Iš plokščiojo kondensatoriaus elektrinės talpos formulės $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$ išreikškime plokštės plotą:

$$S = \frac{Cd}{\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

Tada

$$S_1 = \frac{C_1 d}{\varepsilon_0 \varepsilon}, \quad S_2 = \frac{C_2 d}{\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

Įrašykime atitinkamas dydžių vertes:

$$S_1 = \frac{10^{-12}\ \text{F} \cdot 10^{-3}\ \text{m}}{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \cdot 1} =$$

$$= 1{,}1 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2 = 110\ \text{mm}^2;$$

$$S_2 = \frac{1\ \text{F} \cdot 10^{-3}\ \text{m}}{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \cdot 1} =$$

$$= 1{,}1 \cdot 10^{8}\ \text{m}^2 = 110\ \text{km}^2.$$

Antrasis atsakymas ($S_2 = 110$ km^2) patvirtina, kad 1 F yra labai didelė elektrinė talpa. Tokio kondensatoriaus vienos plokštės plotas būtų lygus net 110 km^2.

b) Taikome tą pačią elektrinės talpos formulę. Įrašę į ją dydžių vertes, gauname:

$$S_3 = \frac{10^{-12}\ \text{F} \cdot 10^{-3}\ \text{m}}{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \cdot 7} =$$

$$= 16 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2 = 16\ \text{mm}^2.$$

Atsakymas: a) 110 mm^2; 110 km^2; b) 16 mm^2.

Užduotys savarankiškam darbui

1. Kondensatoriaus elektros krūvis $4 \cdot 10^{-4}$ C, plokščių potencialų skirtumas 200 V. Apskaičiuokite kondensatoriaus talpą. (2 μF)

2. Kondensatorius, suteikus jam $5 \cdot 10^{-6}$ C elektros krūvį, įgijo 10^{-2} J energijos. Apskaičiuokite kondensatoriaus plokščių įtampą. (4 kV)

3. Vieno kondensatoriaus talpa 400 pF, o kito – 2 μF. Kondensatoriai prijungiami prie to paties įtampos šaltinio. Palyginkite krūvius, susikaupusius šiuose kondensatoriuose.

4. Kaip ir kiek kartų pakis kondensatoriaus talpa, jei atstumą tarp plokščių padidinsime 2 kartus, o plokščių plotą sumažinsime 4 kartus?

5. Plokščiojo kondensatoriaus talpa 60 pF, o kiekvienos jo plokštės plotas 600 cm^2. Koks yra oro tarpo tarp plokščių storis? (8,85 mm)

6. Vieno kondensatoriaus talpa 16 kartų didesnė negu kito. Kondensatoriai įkrauti tiek, kad jų energija yra vienoda. Nustatykite:

a) kuris kondensatorius buvo prijungtas prie aukštesnės įtampos šaltinio;

b) kiek kartų įtampa buvo aukštesnė.

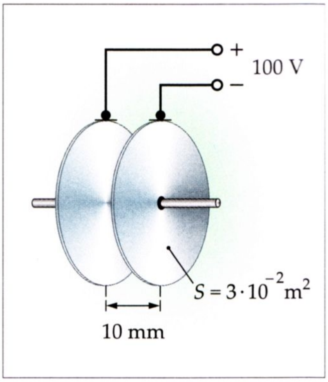
7. Remdamiesi 14.6.8 paveiksle pateiktais duomenimis, atlikite tokias užduotis:

a) apskaičiuokite kondensatoriaus talpą; (26,6 pF)

b) apskaičiuokite kondensatoriaus energiją; ($1{,}3 \cdot 10^{-7}$ J)

c) sąsiuvinyje pavaizduokite tą kondensatorių bei jo elektrinio lauko jėgų linijas.

8. Plokščiasis kondensatorius sudarytas iš dviejų plokščių, kurių kiekvienos plotas 100 cm^2. Plokštes skiria 2 mm tarpas, užpildytas žėručio sluoksniu. Kokį didžiausią krūvį galima suteikti šiam kondensatoriui, jei yra žinoma, kad jis numatytas 3 kV įtampai? (0,8 μC)



14.6.8 pav.

14.7. Kondensatorių jungimo būdai

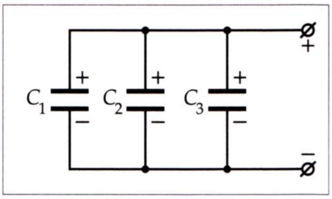
Lygiagretusis kondensatorių jungimas

Kondensatoriai dažnai jungiami vienas su kitu. Taip gaunama jų baterija, kurios elektrinė talpa gali būti didesnė arba mažesnė, nelygu kaip sujungti kondensatoriai. Kai reikia didesnės talpos, kondensatoriai jungiami lygiagrečiai. ***Lygiagrečiúoju kondensãtorių jungimù*** vadinamas toks jų jungimas, kai visų kondensatorių vienas elektrodas prijungiamas prie vieno šaltinio poliaus, o kitas – prie kito poliaus (14.7.1 pav.).

Aptarkime lygiagrečiojo kondensatorių jungimo dėsningumus.

Pagrindinės sąvokos

Lygiagretùsis kondensãtorių jungìmas,
nuoseklùsis kondensãtorių jungìmas,
mišrùsis kondensãtorių jungìmas.



14.7.1 pav.

Visų lygiagrečiai sujungtų kondensatorių įtampa yra vienoda ir lygi visos baterijos įtampai (U_b):

$$U_b = U_1 = U_2 = U_3 = ... = U_n. \quad (14.31)$$

Lygiagrečiai sujungtų kondensatorių baterijos krūvis lygus atskirų kondensatorių krūvių sumai:

$$q_b = q_1 + q_2 + q_3 + ... + q_n. \quad (14.32)$$

Iš elektrinės talpos formulės (14.25) išplaukia, kad elektros krūvis lygus elektrinės talpos ir įtampos sandaugai: $q = CU$. Įrašę šią krūvio išraišką į (14.32) formulę, gauname:

$$C_bU = C_1U + C_2U + C_3U + ... + C_nU_n. \quad (14.33)$$

Abi lygybės puses padalijame iš U:

$$C_b = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n. \quad (14.34)$$

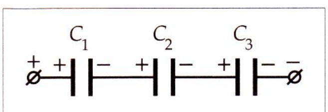
Taigi ***lygiagrečiai sujungtų kondensatorių baterijos talpa lygi atskirų kondensatorių talpų sumai***. Ši išvada patvirtina temos pradžioje pateiktą teiginį „Kai reikia didesnės talpos, kondensatoriai jungiami lygiagrečiai.“ Kondensatorius sujungus lygiagrečiai, jų elektrinė talpa padidėja.

Jei lygiagrečiai sujungiama n vienodos talpos C_0 kondensatorių, (14.34) formulė supaprastėja:

$$C_b = nC_0. \quad (14.35)$$

Nuoseklusis kondensatorių jungimas

Šis kondensatorių jungimo būdas taikomas tada, kai elektros srovės šaltinio įtampa yra aukštesnė už leidžiamąją kondensatorių įtampą. Taip išvengiama kondensatorių pramušimo. Be to, kondensatoriai jungiami nuosekliai, kai norima sumažinti elektrinę talpą. ***Nuosekliúoju kondensãtorių jungimù*** vadinamas toks jų jungimas, kai kondensatoriai į grandinę sujungiami vienas paskui kitą ir prie srovės šaltinio gnybtų prijungiami tik kraštiniai baterijos elektrodai (14.7.2 pav.).



14.7.2 pav.

Kai kondensatoriai sujungti nuosekliai, jiems įsikraunant indukcijos būdu elektros srovės stipris yra vienodas visuose grandinės taškuose. Tačiau žinoma, kad elektros srovė per tarpą tarp kondensatoriaus plokštelių tekėti negali. Kai prie teigiamojo srovės šaltinio poliaus prijungiamas pirmojo kondensatoriaus kairysis elektrodas, dalis elektronų iš jo išeina ir tas elektrodas įsielektrina teigiamai. Dėl to elektronai ima

judėti iš antrojo kondensatoriaus kairiojo elektrodo į pirmojo kondensatoriaus dešinįjį elektrodą. Šis elektrodas įsielektrina neigiamai, antrojo kondensatoriaus kairysis elektrodas – teigiamai. Tai sąlygoja elektronų srautą iš trečiojo kondensatoriaus kairiojo elektrodo į antrojo kondensatoriaus dešinįjį elektrodą. Galiausiai kiekvieno kondensatoriaus kairysis elektrodas įsielektrina teigiamai, o dešinysis – neigiamai. Indukcijos būdu visi kondensatorių elektrodai įgyja vienodo modulio krūvį. Dabar galima suformuluoti pirmąjį nuosekliojo kondensatorių jungimo dėsningumą.

Visų nuosekliai sujungtų kondensatorių krūvis yra vienodas, o baterijos krūvis (q_b) lygus vieno kondensatoriaus krūviui:

$$q_\text{b} = q_1 = q_2 = q_3 = \ldots = q_n. \tag{14.36}$$

Kiekvieno kondensatoriaus elektrodų įtampa yra skirtinga, nes skiriasi kondensatorių talpa:

$$U_1 = \frac{q}{C_1},\ U_2 = \frac{q}{C_2},\ U_3 = \frac{q}{C_3},\ \ldots,\ U_n = \frac{q}{C_n}. \tag{14.37}$$

Iš (14.37) formulių matyti, kad nuosekliai sujungtų kondensatorių įtampos yra atvirkščiai proporcingos jų talpoms:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}. \tag{14.38}$$

Elektros srovės šaltinio įtampa pasiskirsto tarp kondensatorių, todėl nuosekliai sujungtų kondensatorių baterijos įtampa lygi atskirų kondensatorių įtampų sumai:

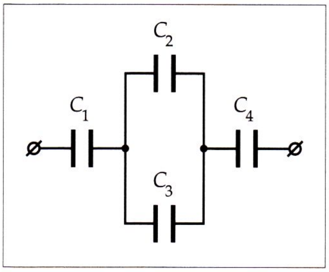
$$U_\text{b} = U_1 + U_2 + U_3 + \ldots + U_n. \tag{14.39}$$

Iš (14.39) formulės, atsižvelgiant į (14.37) formules, gaunama nuosekliai sujungtų kondensatorių baterijos elektrinės talpos formulė:

$$\frac{q}{C_\text{b}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} + \ldots + \frac{q}{C_n}, \tag{14.40}$$

$$\frac{1}{C_\text{b}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n}. \tag{14.41}$$

Dydis, atvirkščias nuosekliai sujungtų kondensatorių baterijos elektrinei talpai, lygus atskirų kondensatorių atvirkštinių talpų sumai.



14.7.3 pav.

Jeigu į bateriją nuosekliai sujungiama n vienodos talpos C_0 kondensatorių, jos talpa lygi

$$C_b = \frac{C_0}{n}. \qquad (14.42)$$

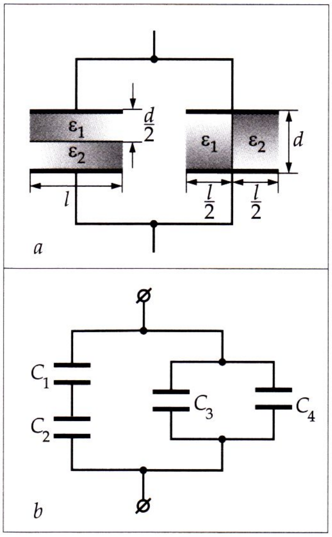
Matome, kad tokios baterijos talpa yra mažesnė už vieno kondensatoriaus talpą.

Mišrusis kondensatorių jungimas

Keletą kondensatorių tarpusavyje galima sujungti ir mišriai: vienus – nuosekliai, kitus – lygiagrečiai (14.7.3 pav.). Toks jungimas vadinamas ***mišriúoju kondensãtorių jungimù***. Jam taikomi nuosekliojo ir lygiagrečiojo jungimo dėsniai.

Aptarėme kondensatorių jungimo būdus, kai tarp kiekvieno kondensatoriaus plokščių yra tos pačios rūšies dielektrikas. Jei kondensatorius pripildomas skirtingų rūšių dielektrikų, situacija pasikeičia. Ji priklauso nuo dielektriko padėties kondensatoriaus viduje. 14.7.4 paveiksle, *a*, pavaizduoti du kondensatoriai, pripildyti skirtingų rūšių dielektrikų, kurių dielektrinė skvarba ε_1 ir ε_2. Šiuo atveju sakome, kad kondensatorių baterija sudaryta iš keturių kondensatorių. Du iš jų (kairėje) sujungti nuosekliai ir du (dešinėje) – lygiagrečiai. Taigi 14.7.4 paveikslo *a* schema yra tapati *b* schemai. Tada visos baterijos elektrinė talpa lygi dviejų lygiagrečiai sujungtų kondensatorių grupių elektrinių talpų sumai:

$$C_b = C_{12} + C_{34}. \qquad (14.43)$$



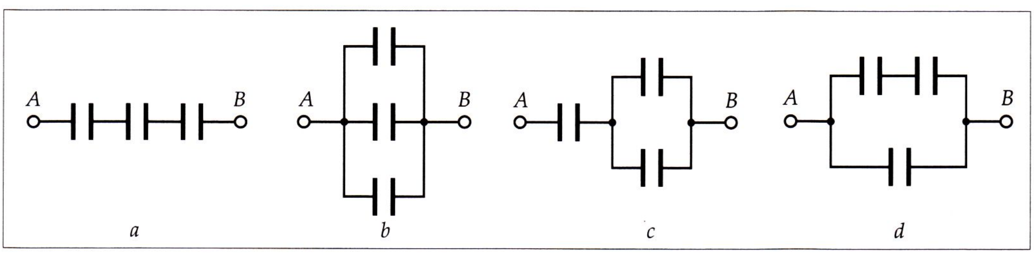
14.7.4 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Kada kondensatoriai jungiami lygiagrečiai, o kada – nuosekliai?

2. 14.7.5 paveiksle pavaizduotos keturios baterijos, kurių kiekviena sudaryta iš trijų 1 μF talpos kondensatorių.

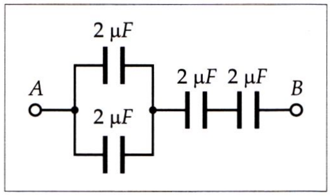
14.7.5 pav.



a) Apskaičiuokite kiekvienos kondensatorių baterijos elektrinę talpą.

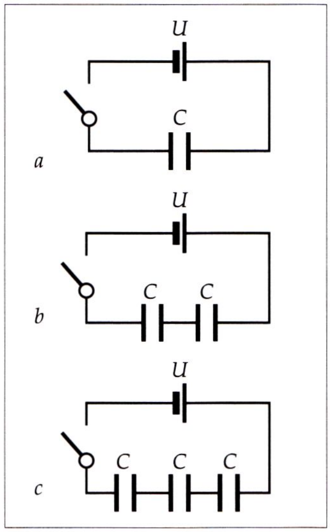
b) Nustatykite, kurios baterijos talpa yra mažiausia, o kurios – didžiausia.

3. 14.7.6 paveiksle pavaizduota kondensatorių baterija. Apskaičiuokite jos elektrinę talpą.



14.7.6 pav.

4. 14.7.7 paveiksle pavaizduotos trys elektrinės grandinės. Visų kondensatorių elektrinė talpa vienoda. Nustatykite, kuri baterija sukaupia daugiausia energijos, kai kondensatoriai įsikrauna iki galo.



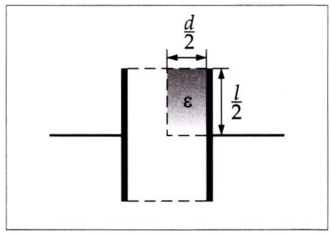
14.7.7 pav.

5. Tarkime, kad 14.7.4 paveiksle pavaizduotų kondensatorių plokštės yra kvadratinės. Jų kraštinės ilgis l, o atstumas tarp plokščių d. Dielektrikų dielektrinė skvarba lygi ε_1 ir ε_2. Apskaičiuokite kondensatorių baterijos elektrinę talpą.

$$\left(C_b = \frac{\varepsilon_0 l^2}{d}\left(\frac{2\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2} + \frac{\varepsilon_1+\varepsilon_2}{2}\right)\right)$$

6. Ketvirtadalis plokščiojo orinio kondensatoriaus tūrio buvo pripildyta dielektriko, kurio $\varepsilon = 5$ (14.7.8 pav.). Kiek kartų pakito šio kondensatoriaus elektrinė talpa?

$\left(\frac{4}{3} \text{ karto}\right)$

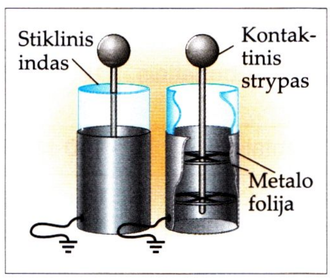


14.7.8 pav.

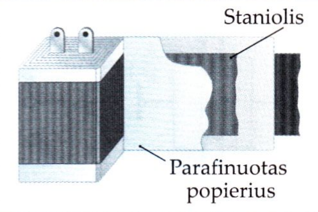
14.8. Kondensatorių gamyba ir naudojimas

Pirmąjį kondensatorių 1745 m. pagamino Leĩdeno universiteto (Olándija) fizikas Piteris Mušenbrukas. Norėdamas įelektrinti vandenį, jis prijungė elektros mašiną prie vinies, įkištos į stiklinę su vandeniu. Atjungęs mašiną nuo vinies, tyrėjas netyčia palietė vinį ir pajuto nepaprastai stiprų elektros smūgį. Vinis šiame įrenginyje buvo vienas kondensatoriaus elektrodas, o eksperimentuotojo, laikiusio stiklinę, delnai – kitas. Įrenginys buvo pavadintas Leideno stikline. Bendžaminas Franklinas pastebėjo, kad elektros krūvį geriau sukaupia tuščia stiklinė, kurią iš abiejų pusių dengia metalo folija (14.8.1 pav.). Dar vėliau paaiškėjo, kad stiklinė nereikalinga. Elektros krūvį gali kaupti du izoliuoti laidininkai.

14.8.1 pav.



Dabar gaminami įvairių rūšių ir įvairios paskirties kondensatoriai. Taupant medžiagas, metaliniai jų elektrodai dažniausiai daromi iš plonos folijos. Kaip



14.8.2 pav.

izoliacinis tarpiklis (dielektrikas) naudojamas parafinuotas popierius, žėrutis, keramika. Pagal dielektriko rūšį kondensatoriai skirstomi į popierinius, žėrutinius, keraminius, orinius ir pan. Popierinį kondensatorių sudaro dvi metalinės folijos juostos, perskirtos parafinuoto popieriaus juostomis. Popieriaus ir folijos juostos susukamos į ritinį ir sudedamos į korpusą (14.8.2 pav.). Kad kondensatorių būtų galima įjungti į elektrinę grandinę, padaromi du išvadai.

Kondensatoriai naudojami įvairiuose radioelektronikos prietaisuose ir elektrotechnikos įrenginiuose: kintamosios srovės lygintuvuose, radijo siųstuvų ir imtuvų virpesių kontūruose. Kondensatorius elektros energiją kaupia ilgesnį laiką, o išsikraudamas atiduoda ją beveik akimirksniu. Kondensatorių būna įvairaus dydžio, skirtingos elektrinės talpos: nuo keleto pikofaradų iki kelių faradų.

Šiuo metu kuriami kondensatoriai, kurių talpa 10 F (įtampa 1,8 V). Jie yra labai maži (vos piršto dydžio). Superkondensatorių talpa siekia 1500 F. Jie naudojami elektrotechnikoje labai stiprioms elektros srovėms gauti, atliekant lazerinės technikos ir valdomosios termobranduolinės sintezės eksperimentus. Nepaprastai tikslūs kondensatoriai dažniausiai būna nedidelės talpos, keleto pikofaradų ar nanofaradų. Labai didelės talpos kondensatoriai naudojami ten, kur tikslumas

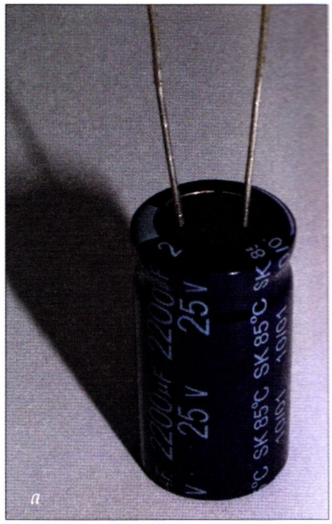
Kondensatoriaus tipas	Talpos diapazonas	Didžiausia įtampa, V	Tikslumas	Sandarumas	Pastabos
Žėrutinis	1 pF–10 nF	100–600	Didelis	Geras	Labai naudingas radijo dažnių diapazone
Keraminis	10 pF–1 μF	50–30 000	Nedidelis	Patenkinamas	Pigus, mažas
Polistireninis	10 pF–2,7 μF	100–600	Labai didelis	Labai geras	Aukštos kokybės, naudojamas tiksliuose filtruose
Polikarbonatinis	100 pF–30 μF	50–800	Labai didelis	Geras	Aukštos kokybės, mažas
Tantalinis	100 nF–500 μF	6–100	Nedidelis	Nedidelis	Didelės talpos
Elektrolitinis (aliumininis)	100 nF–2 F	3–600	Visiškai mažas	Blogas	Naudojamas maitinimo šaltinių filtruose

nesvarbus. Visi kondensatoriai ilgainiui netenka krūvio, yra nesandarūs. Kai kurių kondensatorių talpos diapazonas, tikslumas ir kiti parametrai pateikiami lentelėje (žr. p. 278).

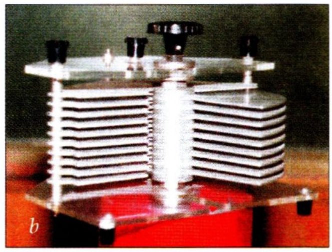
Kondensatoriai dar skirstomi į pastoviosios talpos (14.8.3 pav., *a*) ir kintamosios talpos (14.8.3 pav., *b*) kondensatorius. Pastarųjų talpa reguliuojama keičiant plokščių tarpusavio padėtį. Kai plokštės dengia viena kitą, jų bendras plotas padidėja, kartu padidėja ir kondensatoriaus elektrinė talpa. Mažėjant plokščių plotui, kondensatoriaus talpa mažėja. Kintamosios talpos kondensatoriai naudojami radijo imtuvuose. Jais keičiant virpesių kontūro dažnį, galima priimti norimo dažnio elektromagnetines bangas.

Kondensatoriai montuojami kompiuterio klaviatūroje (14.8.4 pav.). Po kiekvienu klaviatūros klavišu yra kondensatorius. Paspaudus klavišą, atstumas tarp kondensatoriaus plokščių sumažėja ir dėl to pakinta kondensatoriaus talpa. Kintant kondensatoriaus elektrinei talpai, kinta elektrinis signalas mikroschemoje.

Gamtoje taip pat galime įžvelgti kondensatorių. Audros debesis yra vienas jo elektrodas, o Žemės paviršius – kitas. Audros debesis yra labai storas, apie 8–10 km. Kylant aukštyn, oro temperatūra krinta. 10 km aukštyje ji būna apie –50 °C. Nustatyta, kad teigiamai įelektrinti vandens lašeliai užšąla aukštesnėje temperatūroje negu įelektrinti neigiamai. Susidariusiuose ledėsiuose būna šiek tiek oro, todėl jie yra lengvesni ir debesyje kyla aukštyn. Taip elektringosios dalelės persiskiria: teigiamosios kaupiasi debesies viršuje, neigiamosios – apačioje. Debesies apačioje susitelkęs neigiamasis krūvis indukuoja Žemės paviršiuje priešingo ženklo krūvį. Kai elektroduose (debesyje ir Žemės paviršiuje) susikaupia didelis elektros krūvis, ore prasideda elektros išlydis – žaibas. Šis reiškinys analogiškas kondensatoriaus pramušimui.

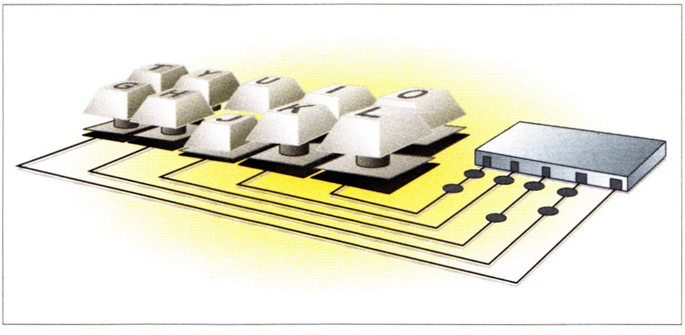


a



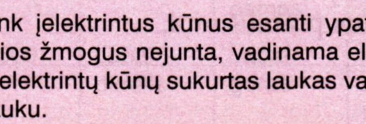
b

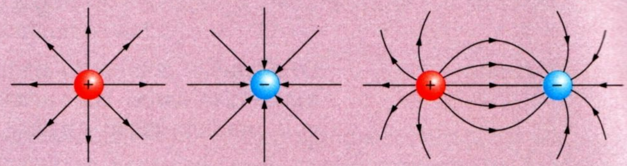
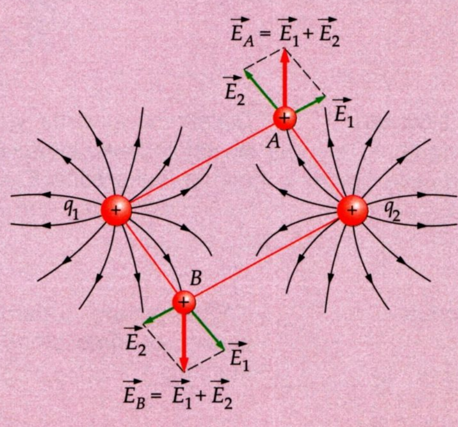
14.8.3 pav.

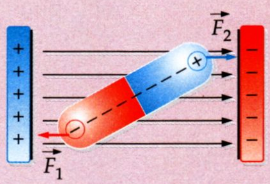
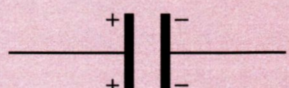


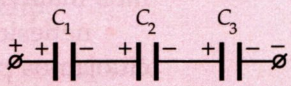
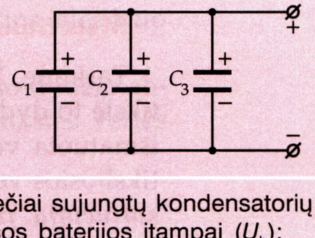
14.8.4 pav.

Skyriaus „Elektrostatika“ apibendrinimas

Elektrostatika	Elektrodinamikos dalis, nagrinėjanti nejudančių elektringųjų dalelių sąveiką, vadinama elektrostatika.
Elektros krūvis	Elektros krūvis – fizikinis dydis, rodantis elektromagnetinės sąveikos intensyvumą. $[q] = 1$ C. 1 C yra krūvis, kurį 1 A stiprio elektros srovė perneša laidininko skerspjūviu per 1 s.
Elektros krūvio tvermės dėsnis	Uždarosios sistemos visų sąveikaujančių kūnų elektros krūvių algebrinė suma yra pastovi: $q_1 + q_2 + q_3 + ... + q_n = \text{const.}$
Kulono dėsnis	Dviejų taškinių nejudančių įelektrintų kūnų sąveikos jėga vakuume yra tiesiogiai proporcinga jų krūvių modulių sandaugai ir atvirkščiai proporcinga atstumo tarp jų kvadratui: $F = k\frac{\lvert q_1\rvert \cdot \lvert q_2\rvert}{r^2}$; $k = 9 \cdot 10^9$ N · m²/C².  Įelektrintų kūnų sąveikos jėgos – centrinės jėgos, veikiančios išilgai tiesės, jungiančios tuos kūnus.
Elektrinis laukas	Erdvėje aplink įelektrintus kūnus esanti ypatingos formos materija, kurios žmogus nejunta, vadinama elektriniu lauku. Nejudančių įelektrintų kūnų sukurtas laukas vadinamas elektrostatiniu lauku.
Elektrinio lauko stipris	Elektrinio lauko stipris yra fizikinis dydis, lygus jėgos, kuria laukas veikia taškinį įelektrintą kūną, ir to kūno krūvio santykiui: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$; $[E] = 1$ N/C = 1 V/m.

Elektrinio lauko jėgų linijos	Nenutrūkstamos linijos, kurių liestinės kiekviename taške sutampa su elektrinio lauko stiprio vektoriumi, vadinamos to lauko jėgų linijomis. 
Įkrauto kondensatoriaus energija	Įkrauto kondensatoriaus energija lygi darbui, kurį atliktų elektrinis laukas, suartindamas kondensatoriaus elektrodus: $$W = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2};$$ čia q – kondensatoriaus elektrodo sukauptas krūvis, U – įtampa tarp elektrodų, C – kondensatoriaus talpa.
Elektrinių laukų superpozicijos principas	Jei tiriamajame erdvės taške skirtingi įelektrinti kūnai sukuria elektrinius laukus, kurių stipris $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$ ir t. t., tai atstojamojo elektrinio lauko stipris $\vec{E}$ lygus visų elektrinių laukų stiprių geometrinei sumai: $$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + ...$$ 
Elektrinio lauko potencialas	Fizikinis dydis, lygus elektriniame lauke esančio krūvio potencinės energijos ir to krūvio santykiui, vadinamas elektrinio lauko potencialu: $$\varphi = \frac{q \cdot E \cdot d}{q} = Ed.$$ Elektrinio lauko potencialas – skaliarinis dydis. Jo matavimo vienetas yra voltas.

Potencialų skirtumas	Potencialų skirtumas yra potencialo verčių pradiniame ir galiniame trajektorijos taške skirtumas. Potencialų skirtumas dar vadinamas įtampa: $$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$
Elektrinė įtampa	Dviejų taškų potencialų skirtumas (arba įtampa) lygus elektrinio lauko darbo, kuris atliekamas perkeliant teigiamąjį krūvį iš pradinio taško į galinį, ir to krūvio santykiui: $$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}.$$
Voltas	Potencialų skirtumo matavimo vienetas vadinamas voltu. Dviejų taškų potencialų skirtumas lygus vienetui, kai, perkeldamas 1 C krūvį turintį kūną iš vieno taško į kitą, elektrinis laukas atlieka 1 J darbą: $$1\ \text{V} = \frac{1\ \text{J}}{1\ \text{C}}.$$
Dielektriko poliarizacija	Dielektriko teigiamųjų ir neigiamųjų susijusių elektringųjų dalelių poslinkis priešingomis kryptimis, veikiant elektriniam laukui, vadinamas dielektriko poliarizacija. 
Dielektrinė skvarba	Dielektrinė skvarba yra fizikinis dydis, rodantis, kiek kartų elektrinio lauko stipris E vienalyčiame dielektrike yra mažesnis už lauko stiprį E_0 vakuume: $$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$
Kondensatorius	Kondensatorių sudaro du laidininkai, perskirti dielektriko sluoksniu, kurio storis mažas, palyginti su laidininko matmenimis. 
Kondensatoriaus elektrinė talpa	Kondensatoriaus elektrine talpa vadinamas vieno laidininko krūvio ir potencialų skirtumo tarp to laidininko ir gretimo laidininko santykis: $$C = \frac{q}{U};$$ $$[C] = 1\ \text{F}.$$

Plokščiojo kondensatoriaus talpa	Plokščiojo kondensatoriaus elektrinė talpa priklauso nuo: • bendro plokščių ploto S; • atstumo d tarp plokščių; • dielektriko, įterpto tarp kondensatoriaus plokščių, dielektrinės skvarbos. $$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}.$$
Nuoseklusis kondensatorių jungimas	Nuosekliuoju kondensatorių jungimu vadinamas toks jų jungimas, kai kondensatoriai į grandinę sujungiami vienas paskui kitą ir prie srovės šaltinio gnybtų prijungiami tik kraštiniai baterijos elektrodai. 
Nuosekliojo kondensatorių jungimo dėsningumai	1. Visų nuosekliai sujungtų kondensatorių krūvis yra vienodas, o baterijos krūvis (q_b) lygus vieno kondensatoriaus krūviui: $$q_b = q_1 = q_2 = q_3 = \ldots = q_n.$$ 2. Elektros srovės šaltinio įtampa pasiskirsto tarp kondensatorių, todėl nuosekliai sujungtų kondensatorių baterijos įtampa lygi atskirų kondensatorių įtampų sumai: $$U_b = U_1 + U_2 + U_3 + \ldots + U_n.$$ 3. Dydis, atvirkščias nuosekliai sujungtų kondensatorių baterijos elektrinei talpai, lygus atskirų kondensatorių atvirkštinių talpų sumai: $$\frac{1}{C_b} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n}.$$
Lygiagretusis kondensatorių jungimas	Lygiagrečiuoju kondensatorių jungimu vadinamas toks jų jungimas, kai visų kondensatorių vienas elektrodas prijungiamas prie vieno šaltinio poliaus, o kitas – prie kito poliaus. 
Lygiagrečiojo kondensatorių jungimo dėsningumai	1. Visų lygiagrečiai sujungtų kondensatorių įtampa yra vienoda ir lygi visos baterijos įtampai (U_b): $$U_b = U_1 = U_2 = U_3 = \ldots = U_n.$$ 2. Lygiagrečiai sujungtų kondensatorių baterijos krūvis lygus atskirų kondensatorių krūvių sumai: $$q_b = q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_n.$$ 3. Lygiagrečiai sujungtų kondensatorių baterijos talpa lygi atskirų kondensatorių talpų sumai: $$C_b = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n.$$

Laboratoriniai darbai

Matavimo paklaidų samprata

Atliekant fizikos laboratorinius darbus, tenka matuoti įvairius dydžius, paskui apdoroti matavimo rezultatus. Matavimas – fizikinio dydžio vertės gavimas bandymo metu naudojant matavimo priemones. Matavimas gali būti:

- tiesioginis, kai fizikinio dydžio vertės nustatomos matavimo priemonėmis;
- netiesioginis, kai fizikinio dydžio vertės apskaičiuojamos pagal formules, siejančias tą dydį su kitais fizikiniais dydžiais, kurių vertės nustatomos jau matuojant tiesiogiai.

Matuojant fizikinius dydžius, neįmanoma gauti absoliučiai tikslaus rezultato. Netikslumų gali atsirasti dėl matavimo prietaisų netikslumo, dėl paties matavimo. Išmatuotos arba apskaičiuotos vertės nukrypimas nuo tiksliosios vertės vadinamas ***matãvimo pãklaida***. Pagal atsiradimo priežastis paklaidos skirstomos į dvi rūšis:

- *sistemingąsias paklaidas*, atsirandančias dėl matavimo prietaisų netikslumo, netinkamų matavimo metodų;
- *atsitiktines paklaidas*, priklausančias nuo eksperimentuotojo įgūdžių, kruopštumo ir nuo aplinkos poveikio (temperatūros, oro drėgnio ir pan.). Matuodami labiau atsižvelgsime į sistemingąsias paklaidas.

Matavimo paklaidų skaičiavimas

Tarkime, X – matuojamas fizikinis dydis, X_{ap} – apytikslė to dydžio vertė, t. y. tiesiogiai arba netiesiogiai išmatuota vertė. Išmatuotos apytikslės vertės X_{ap} ir tiksliosios vertės X skirtumo modulis vadinamas ***absoliučiája fizikìnio dỹdžio matãvimo pãklaida***. Ji žymima ΔX.

Didžiausia absoliučioji tiesioginio matavimo paklaida lygi prietaiso absoliučiõsios paklaidõs $\Delta_{pr}X$ ir atskaitõs absoliučiõsios paklaidõs $\Delta_a X$ sumai:

$$\Delta X = \Delta_{pr}X + \Delta_a X.$$

Iš pradžių aptarkime, kaip skaičiuojama prietaiso absoliučioji paklaida.

Norint ją rasti, reikia žinoti prietaiso tikslumo klasę. Ji nurodoma prietaiso skalėje arba pase. Pagal tikslumą visi elektros prietaisai skirstomi į septynias klases: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Žinant prietaiso tikslumo klasę (γ_{pr}) ir visą skalę (X_{max}), galima rasti absoliučiąją paklaidą $\Delta_{pr}X$:

$$\Delta_{pr}X = \frac{\gamma_{pr}X_{max}}{100}.$$

Pavyzdžiui, jei ampermetro tikslumo klasė yra 4 ir juo galima išmatuoti 2 A srovės stiprį, tai ampermetro absoliučioji paklaida apskaičiuojama taip:

$$\Delta I_{pr} = 2\ \text{A} \cdot \frac{4}{100} = 0{,}08\ \text{A}.$$

Išsiaiškinkime, kaip skaičiuojama absoliučioji atskaitos paklaida $\Delta_a X$. Ji atsiranda matuojant, pavyzdžiui, netiksliai fiksuojant matavimo prietaisų rodmenis. ***Absoliučioji atskaitos paklaida lygi pusei smulkiausios prietaiso padalos vertės.*** Matuojant laiką, absoliučioji matavimo paklaida lygi sekundmačio arba laikrodžio padalos vertei, o matuojant masę svirtinėmis svarstyklėmis – mažiausio svarsčio, kuris neturi įtakos svarstyklių pusiausvyrai, masei.

Atsižvelgiant į absoliučiąją matavimo paklaidą, matavimo rezultatas užrašomas taip:

$$X = X_{ap} \pm \Delta X.$$

Absoliučioji matavimo paklaida paprastai apvalinama iki vieno reikšminio skaitmens ($\Delta X = 0{,}46 \approx 0{,}5$); skaitinė matavimo rezultato vertė suapvalinama tiek, kad paskutinis jos skaitmuo būtų tos pačios eilės kaip paklaidos skaitmuo ($X = 10{,}442 \approx 10{,}4$).

Santykinė paklaida (ε) lygi matuojamo dydžio absoliučiosios paklaidos ir to dydžio apytikslės vertės santykiui:

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_{ap}} \cdot 100\ \%.$$

Santykinė paklaida rodo matavimo kokybę. Kuo mažesnė santykinė paklaida, tuo tikslesnis matavimas.

Matuojant netiesiogiai, patariama pirmiausia apskaičiuoti santykinę paklaidą. Tai atliekama tokia tvarka. Iš pradžių apskaičiuojamos tiesiogiai matuojamų dydžių absoliučiosios paklaidos, paskui netiesiogiai matuojamo dydžio santykinė paklaida, kuri

lygi visų matuojamų dydžių santykinių paklaidų sumai. Pavyzdžiui, jei netiesiogiai matuojamas fizikinis dydis X apskaičiuojamas pagal formulę

$$X = \frac{A}{B},$$

tai santykinė paklaida

$$\varepsilon_x = \varepsilon_A + \varepsilon_B = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}.$$

Galiausiai randama netiesiogiai matuojamo dydžio absoliučioji paklaida:

$$\Delta X = X_{\text{ap}}\varepsilon.$$

Aptarėme pavyzdį, kaip apskaičiuojama netiesioginio matavimo paklaida, kai fizikinis dydis išreiškiamas dviejų fizikinių dydžių santykiu. Tačiau netiesiogiai matuojami fizikiniai dydžiai gali būti išreikšti ir sudėtingesnėmis formulėmis. Kaip apskaičiuojamos santykinės paklaidos kai kuriais kitais atvejais, rodo 2 lentelė. Kiekviename laboratorinių darbų apraše, kuris pateikiamas vadovėlyje, paaiškinta, kaip reikia apskaičiuoti netiesioginių matavimų santykines paklaidas.

2 lentelė

<table>
<tr><th>Eil. Nr.</th><th>Fizikinio dydžio formulė</th><th>Santykinės paklaidos formulė</th></tr>
<tr><td>1.</td><td>$A = BCD$</td><td rowspan="2">$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta D}{D}$</td></tr>
<tr><td>2.</td><td>$A = \frac{B}{CD}$</td></tr>
<tr><td>3.</td><td>$A = B + C$</td><td>$\varepsilon = \frac{\Delta B + \Delta C}{B + C}$</td></tr>
<tr><td>4.</td><td>$A = B\sqrt{\frac{C}{D}}$</td><td>$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta D}{D}$</td></tr>
</table>

Matuojant fizikinius dydžius, galutinio rezultato santykinė paklaida turėtų būti ne didesnė kaip 5 %. Jeigu ji viršija 10 %, siūloma matuoti dar kartą.

6 laboratorinis darbas

Mechaninės energijos tvermės dėsnio tyrimas

Darbo tikslas: bandymais patikrinti mechaninės energijos tvermės dėsnį.

Teorinis darbo pagrindimas. Pilnutinės mechaninės energijos tvermės dėsnis teigia, kad uždarosios sistemos kūnų, veikiančių vienas kitą gravitacijos ir tamprumo jėgomis, pilnutinė mechaninė energija nekinta. Šį dėsnį tikrinant bandymais, lyginami du dydžiai: prie spyruoklės prikabinto krintančio kūno potencinės energijos sumažėjimas ir ištemptos spyruoklės potencinės energijos padidėjimas (1 pav.). Ant dinamometro kabliuko pakabintas pasvaras pakeliamas tiek, kad spyruoklė būtų neištempta. Nuliniu lygiu pasirenkamas stalo paviršius. Tada pasvaro potencinė energija stalo atžvilgiu lygi mgH. Paleidus pasvarą, jo potencinė energija mažėja. Galinėje padėtyje ($x = h$) pasvaro potencinė energija sumažėja dydžiu:

$$E_1 = mgh. \qquad (1)$$

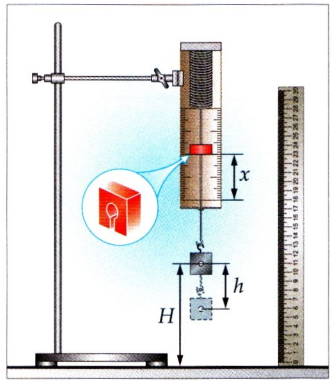
Pasvarui leidžiantis, spyruoklė deformuojasi. Dėl to jos energija padidėja dydžiu

$$E_2 = \frac{kx^2}{2}. \qquad (2)$$

Darbo priemonės: 1) stovas su mova ir laikikliu; 2) dinamometras, kurio standumo koeficientas lygus 40 N/m; 3) fiksatorius (lengva kamštinė 5 mm × × 7 mm × 1,5 mm dydžio plokštelė, peiliu įpjauta iki centro); 4) matavimo liniuotė; 5) (0,100 ± 0,005) kg masės pasvaras iš mechanikos komplekto.

Darbo eiga

1. Patikrinkite, kaip veikia fiksatorius. Nuleiskite jį iki skalės apačios ant ribojančios apkabėlės. Spyruoklę ištempkite, paskui paleiskite. Fiksatorius kartu su dinamometro spyruoklės tiesiąja dalimi turi pakilti aukštyn ir parodyti didžiausią spyruoklės pailgėjimą.
2. Ant dinamometro kabliuko pakabinkite pasvarą.
3. Ranka pakelkite jį aukštyn, atleiskite spyruoklę, o fiksatorių nustatykite apačioje ties apkabėle.
4. Paleiskite pasvarą. Krisdamas jis ištemps spyruoklę.
5. Nukabinkite pasvarą ir pagal fiksatoriaus padėtį liniuote išmatuokite didžiausią spyruoklės pailgėjimą x_m.



1 pav.

6. Bandymą pakartokite keletą kartų ir užpildykite matavimo rezultatų lentelę:

Bandymo numeris	x_m, m	$x_{m\,vid} = h_{vid}$	$E_{1\,vid}$, J	$E_{2\,vid}$, J	$\frac{E_{1\,vid}}{E_{2\,vid}}$
1					
2					
3					
4					
5					

7. Santykį $\frac{E_{1\,\text{vid}}}{E_{2\,\text{vid}}}$ palyginkite su vienetu. Padarykite išvadą apie energijos tvermės dėsnio tikrinimo paklaidą.

Klausimai ir užduotys

1. Apibūdinkite veiksnius, lėmusius matavimo rezultatų paklaidą.

2. Kokia yra energijos tvermės dėsnio esmė?

3. Kokia yra amžinojo variklio idėja? Kodėl jos neįmanoma realizuoti?

4. Kokie energijos virsmai vyksta krintant varvekliui, kylant lėktuvui, tekant upėms?

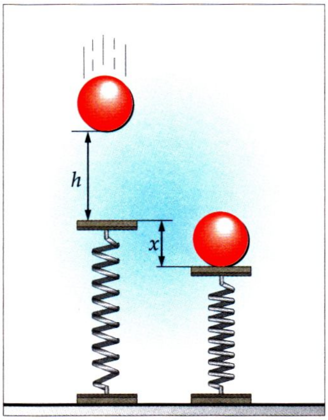
5. Domas išjungė automobilio variklį, kai greitis buvo 72 km/h. Pavažiavęs 34 m, automobilis sustojo veikiamas 5880 N trinties jėgos. Apskaičiuokite:

a) automobilio kinetinę energiją variklio išjungimo momentu;

b) automobilio masę.

6. Rutulys, kurio masė 2 kg, krinta iš 2 m aukščio ant vertikaliai prie stalo pritvirtintos spyruoklės (2 pav.). Spyruoklės standumo koeficientas 600 N/m. Apskaičiuokite didžiausią spyruoklės susispaudimą.

2 pav.



7 laboratorinis darbas
Laisvojo kritimo pagreičio nustatymas su svyruokle

Darbo tikslas: atliekant bandymus su matematine svyruokle, nustatyti laisvojo kritimo pagreičio vertę.

Teorinis darbo pagrindimas. Pagreitis, kurį įgyja laisvai krintantys kūnai, vadinamas laisvojo kritimo pa-

greičiu. Jo vertę konkrečioje vietovėje galima sužinoti naudojant matematinę svyruoklę. Primename, kad matematine svyruokle vadinamas mažų matmenų kūnas, pakabintas ant nesvaraus ir netįsaus siūlo (1 pav.). Matematinės svyruoklės svyravimo periodas yra tiesiogiai proporcingas kvadratinei šakniai iš svyruoklės ilgio ir atvirkščiai proporcingas kvadratinei šakniai iš laisvojo kritimo pagreičio:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1)$$

Iš (1) formulės išreiškę laisvojo kritimo pagreitį, gauname:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \quad (2)$$

Matome, kad, norint bandymais nustatyti laisvojo kritimo pagreitį, reikia išmatuoti matematinės svyruoklės ilgį l ir apskaičiuoti jos svyravimo periodą T. Svyravimo periodą randame padaliję svyruoklės svyravimo trukmę t iš svyravimų skaičiaus N:

$$T = \frac{t}{N}. \quad (3)$$

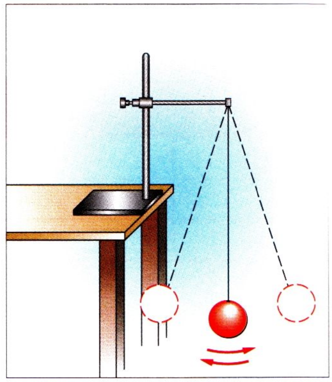
(3) formulę įrašę į (2), gauname laisvojo kritimo pagreičio formulę:

$$g = \frac{4\pi^2 l N^2}{t^2}. \quad (4)$$

Darbo priemonės: 1) stovas; 2) ilgas siūlas; 3) pasvaras; 4) liniuotė su milimetrinėmis padalomis; 5) sekundmatis arba laikrodis, turintis sekundinę rodyklę.

Darbo eiga

1. Ant stalo krašto pastatykite stovą, o prie jo pritvirtinkite laikiklį. Prie laikiklio pririškite siūlą su pasvaru. Siūlo ilgį pasirinkite tokį, kad atstumas nuo pasvaro iki grindų būtų apie 5 cm (1 pav.).
2. Išmatuokite svyruoklės ilgį l (1 mm tikslumu).
3. Patraukite svyruoklės pasvarą apie 10 cm į šoną ir paleiskite.
4. Laikrodžiu išmatuokite laiką t, per kurį svyruoklė susvyruos 50 kartų (primename, kad svyruoklė tada susvyruoja vieną kartą, kai grįžta į pradinę kraštinę padėtį).
5. Pagal (4) formulę apskaičiuokite laisvojo kritimo pagreitį.



1 pav.

6. Bandymą pakartokite keletą kartų ir užpildykite matavimo rezultatų lentelę:

Bandymo numeris	l, m	t, s	N	g, m/s^2	g_{vid}, m/s^2
1					
2					
3					

7. Apskaičiuokite pagreičio santykinę paklaidą:

$$\varepsilon = \varepsilon_l + \varepsilon_t,$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} + \frac{2\Delta t}{t}.$$

8. Apskaičiuokite pagreičio absoliučiąją paklaidą:

$$\Delta g = \varepsilon \cdot g.$$

9. Parašykite laboratorinio darbo išvadą.

Klausimai ir užduotys

1. Gautą pagreičio vertę palyginkite su teorine verte (9,81 m/s^2).

2. Kokie veiksniai lemia laisvojo kritimo pagreičio vertę?

3. Ar galima erdvėlaivyje naudoti laikrodį su svyruokle? Atsakymą pagrįskite.

4. Prie spyruoklės prikabintas pasvaras patraukiamas nuo pusiausvyros padėties 2 cm. Per kurią svyravimo periodo dalį jis nueis pirmąjį kelio centimetrą?

5. Harmoningai svyruojančio rutuliuko amplitudė 5 cm, o periodas 0,2 s. Apskaičiuokite rutuliuko didžiausią greičio ir pagreičio vertę.

8 laboratorinis darbas

Gei-Liusako dėsnio tikrinimas

Darbo tikslas: bandymais patikrinti Gei-Liusako dėsnį.

Teorinis darbo pagrindimas. Gei-Liusako dėsnis teigia, kad tam tikros masės dujų tūrio ir temperatūros santykis yra pastovus, kai slėgis nekinta:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (1)$$

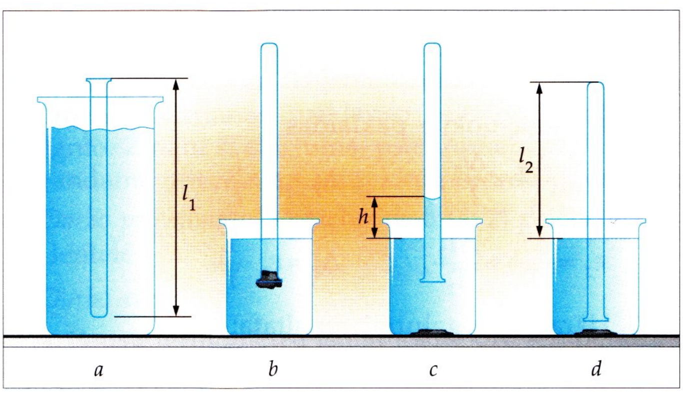
Norint šį dėsnį patikrinti bandymais, reikia pastovaus slėgio sąlygomis išmatuoti tų pačių dujų tūrį ir temperatūrą, kai jos yra dvejopos būsenos. Bandymui naudojamas stiklinis vamzdelis užlydytu galu. Užlydytas jo galas panardinamas į karštą vandenį, kurio temperatūra T_1 (1 pav., *a*). Vamzdelyje esančio oro būseną apibūdina termodinaminiai parametrai V_1 ir T_1. Tai – pradinė oro būsena. Kad, jai keičiantis, oro masė nepakistų, atvirasis vamzdelio galas užlipdomas plastilinu. Tada vamzdelis iš karšto vandens ištraukiamas, apverčiamas ir panardinamas į indą su kambario temperatūros vandeniu (1 pav., *b*). Po vandeniu plastilinas nuo vamzdelio galo nukrapštomas. Orui vamzdelyje auštant, juo ima kilti vanduo, todėl oro tūris vamzdelyje sumažėja: $V_2 < V_1$ (1 pav., *c*). Jo slėgis lygus $p = p_{atm} - \rho g h$. Kad vamzdelyje esančio oro slėgis susilygintų su atmosferos slėgiu, vamzdelis paneriamas giliau – tada vandens lygis jame sutampa su vandens lygiu inde (1 pav., *d*). Tai – galinė oro būsena, kurios termodinaminiai parametrai yra T_2 ir V_2. Jei vamzdelio skersmuo pastovus, pirmosios ir antrosios būsenos oro tūrių santykį galima pakeisti oro stulpelio aukščių santykiu:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{Sl_1}{Sl_2} = \frac{l_1}{l_2}. \qquad (2)$$

(2) įrašius į (1), gaunama formulė, pagal kurią galima bandymais patikrinti Gei-Liusako dėsnį:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{T_1}{T_2}. \qquad (3)$$

Temperatūra matuojama termometru, oro stulpelio aukštis – liniuote.



1 pav.

Darbo priemonės: 1) 500–600 mm ilgio stiklinis vamzdelis; 2) aukštas indas su karštu (maždaug 60 °C) vandeniu; 3) indas su kambario temperatūros vandeniu; 4) termometras; 5) gabaliukas plastilino; 6) milimetrinė liniuotė.

Darbo eiga

1. Išmatuokite stiklinio vamzdelio ilgį l_1.
2. Vamzdelį įleiskite į indą su karštu vandeniu atviru galu aukštyn ir palaikykite 2–3 min (1 pav., *a*).
3. Termometru išmatuokite karšto vandens temperatūrą T_1.
4. Neišimdami vamzdelio, atvirąjį jo galą užlipdykite plastilinu.
5. Vamzdelį išimkite iš indo su karštu vandeniu, apverskite ir užlipdytą jo galą panardinkite į indą su kambario temperatūros vandeniu (1 pav., *b*).
6. Nekeisdami vamzdelio vertikalios padėties, nukrapštykite plastiliną. Vanduo iš indo pradės kilti vamzdeliu aukštyn (1 pav., *c*).
7. Kai vanduo nustos kilti, vamzdelį panardinkite giliau, kad vandens lygis inde ir vamzdelyje sutaptų (1 pav., *d*).
8. Išmatuokite oro stulpelio aukštį l_2 ir kambario temperatūrą T_2.
9. Užpildykite matavimo rezultatų lentelę:

l_1, mm	T_1, K	l_2, mm	T_2, K

10. Apskaičiuokite santykius $\frac{l_1}{l_2}$ ir $\frac{T_1}{T_2}$.
11. Užpildykite skaičiavimų ir paklaidų lentelę:

$\Delta_{pr}l$, mm	$\Delta_a l$, mm	Δl, mm	T_1, K	T_2, K	$\Delta_{pr}T$, K	$\Delta_a T$, K	ΔT, K	$\frac{l_1}{l_2}$	ε_1, %	Δ_1	$\frac{T_1}{T_2}$	ε_2, %	Δ_2

12. Apskaičiuokite paklaidas:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l_2}{l_2}, \qquad \Delta_1 = \varepsilon_1 \cdot \frac{l_1}{l_2};$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{\Delta T_2}{T_2}, \qquad \Delta_2 = \varepsilon_2 \cdot \frac{T_1}{T_2}.$$

13. Užrašykite galutinį rezultatą:

$$\frac{l_1}{l_2} = \ldots \pm \ldots; \qquad \frac{T_1}{T_2} = \ldots \pm \ldots .$$

14. Palyginkite santykius $\frac{l_1}{l_2}$ ir $\frac{T_1}{T_2}$.
15. Parašykite laboratorinio darbo išvadą.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl, nukrapščius plastiliną, vanduo kyla vamzdeliu?

2. Pagrįskite, kodėl 1 paveiksle, *c*, pavaizduotu atveju oro slėgis vamzdelyje lygus $p = p_{atm} - \rho g h$.

3. Kodėl, panardinus stiklinį vamzdelį giliau į vandenį (1 pav., *d*), oro slėgis pasidaro lygus atmosferos slėgiui?

4. Nubraižykite 3 g vandenilio izobaras p ir T, p ir V, V ir T koordinačių sistemose. Tarkite, kad atmosferos slėgis normalus.

9 laboratorinis darbas

Oro santykinio drėgnio nustatymas

Darbo tikslas: psichrometru išmatuoti santykinį oro drėgnį.

Teorinis darbo pagrindimas. Santykiniu oro drėgniu φ vadinamas ore esančių vandens garų dalinio slėgio p ir oro temperatūros sočiųjų vandens garų slėgio p_0 santykis, išreikštas procentais:

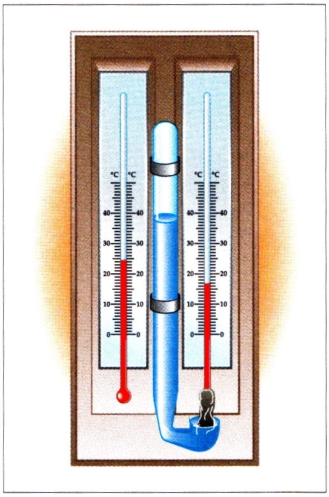
$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\ \%. \quad (1)$$

Santykinis oro drėgnis nustatomas psichrometru (1 pav.). Jį sudaro du termometrai: sausas ir drėkinamas. Sausas termometras rodo oro temperatūrą. Drėkinamo termometro rezervuaras apvyniotas drobinio arba kitokio higroskopinio audinio atraiža, o šios vienas galas įmerktas į vandenį. Drėkinamas termometras rodo žemesnę temperatūrą negu sausas, nes, vandeniui garuojant, aušta. Sauso ir drėkinamo termometrų rodmenų skirtumas priklauso nuo oro santykinio drėgnio. Žinant šį skirtumą, psichrometrinėje lentelėje randama atitinkama santykinio oro drėgnio vertė.

Darbo priemonės: 1) psichrometras; 2) psichrometrinė lentelė.

Darbo eiga

1. Sausu termometru išmatuokite oro temperatūrą.
2. Apskaičiuokite sauso ir drėkinamo termometro rodmenų skirtumą.



1 pav.

3. Naudodamiesi psichrometrine lentele, apskaičiuokite santykinį oro drėgnį.
4. Užpildykite matavimo rezultatų lentelę:

Sauso termometro rodmuo	Drėkinamo termometro rodmuo	Sauso ir drėkinamo termometro rodmenų skirtumas	Santykinis oro drėgnis

5. Parašykite laboratorinio darbo išvadą.

Klausimai ir užduotys

1. Kaip kinta sauso ir drėkinamo termometro rodmenų skirtumas, kai santykinis oro drėgnis didėja; kai mažėja?

2. Kam lygus sauso ir drėkinamo termometro rodmenų skirtumas, kai santykinis oro drėgnis yra 100 %?

3. Remdamiesi laboratorinio darbo duomenimis, apskaičiuokite vandens garų dalinį slėgį.

4. Apskaičiuokite, kiek vandens garų yra patalpoje, kurioje atliekate laboratorinį darbą.

5. Remdamiesi laboratorinio darbo duomenimis, nustatykite rasos tašką.

6. Kam lygus sauso ir drėkinamo termometro rodmenų skirtumas esant rūkui?

10 laboratorinis darbas

Vandens paviršiaus įtempties koeficiento nustatymas lašinimo metodu

Darbo tikslas: lašinimo metodu nustatyti vandens paviršiaus įtempties koeficientą.

Teorinis darbo pagrindimas. Paviršiaus įtempties jėga vadiname jėgą, kuri veikia vandens paviršiaus liestinės kryptimi statmenai linijai, ribojančiai tą paviršių, ir stengiasi sumažinti jį iki minimumo. Paviršiaus įtempties jėgos F, kuri veikia ilgio l paviršiaus kontūrą, modulio ir to ilgio santykis vadinamas vandens paviršiaus įtempties koeficientu:

$$\sigma = \frac{F}{l}. \qquad (1)$$

Paviršiaus įtempties koeficientas priklauso nuo besiribojančių terpių kilmės ir temperatūros. Jo matavimo vienetas yra niutonas metrui (N/m).

Paviršiaus įtempties koeficientą galima nustatyti bandymais. Atlikdami šį laboratorinį darbą, mokysitės apskaičiuoti vandens paviršiaus įtempties koeficientą lašinimo metodu. Lašinant vandenį iš pipetės, besiformuojančio lašo sunkį atsveria ties lašo kaklelio riba atsiradusi vandens paviršiaus įtempties jėga. Ji nukreipta aukštyn. Lašui didėjant, sunkis susilygina su paviršiaus įtempties jėga:

$$F_s = F. \tag{2}$$

Įrašę jėgų išraiškas, gauname:

$$m_0 g = \sigma l. \tag{3}$$

Iš (3) formulės išreiškiame paviršiaus įtempties koeficientą:

$$\sigma = \frac{m_0 g}{l} = \frac{m_0 g}{\pi d}; \tag{4}$$

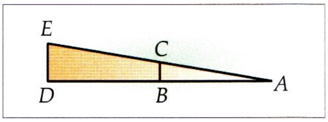
čia m_0 – vieno lašo masė, d – lašo kaklelio skersmuo, lygus pipetės angos skersmeniui.

Iš (4) formulės matyti, kad, norint lašinimo metodu nustatyti vandens paviršiaus įtempties koeficientą, reikia apskaičiuoti vieno vandens lašo masę ir pipetės angos skersmenį.

Darbo priemonės: 1) indelis vandeniui; 2) vanduo; 3) medicininė pipetė; 4) tikslios svarstyklės; 5) milimetrinė liniuotė; 6) standaus popieriaus lapas; 7) žirklės.

Darbo eiga

1. Išmatuokite vidinį pipetės angos skersmenį. Iš standaus popieriaus iškirpkite statųjį trikampį. Kad matuoti būtų lengviau, ilgąjį statinį (AD) pasirinkite 10 cm ilgio, o trumpąjį (DE) – 1 cm ilgio (1 pav.). Trikampio smailųjį kampą A įkiškite į pipetę tiek, kiek galima. Pažymėkite atramos tašką B. Paskui iš šio taško iškelkite statmenį BC. Jo ilgį apskaičiuokite remdamiesi panašiųjų trikampių savybėmis. Kadangi statinių santykis lygus 1 : 10, tai atkarpos BC ilgį apskaičiuoti nesunku. Pavyzdžiui, jei AB = 1,5 cm, tai BC = 1,5 mm.



1 pav.

2. Svarstyklėmis nustatykite tuščio indelio masę m_1 (10 mg tikslumu).

3. Į indelį įlašinkite N = 100 lašų vandens.

4. Svarstyklėmis nustatykite indelio su vandeniu masę m_2 (10 mg tikslumu).

5. Apskaičiuokite šimto vandens lašų masę $m = m_2 - m_1$.

6. Apskaičiuokite vidutinę vieno lašo masę m_0.

7. Užpildykite matavimo rezultatų lentelę:

N	m_1, kg	m_2, kg	m, kg	m_0, kg	l, m	d, m	σ, N/m

8. Naudodamiesi (4) formule, apskaičiuokite vandens paviršiaus įtempties koeficientą.

9. Apskaičiuokite vandens paviršiaus įtempties koeficiento santykinę paklaidą:

$$\varepsilon = \varepsilon_{m_0} + \varepsilon_d,$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta m_0}{m_0} + \frac{\Delta d}{d}.$$

10. Apskaičiuokite vandens paviršiaus įtempties koeficiento absoliučiąją paklaidą:

$$\Delta\sigma = \varepsilon \cdot \sigma.$$

11. Užrašykite galutinį rezultatą:

$$\sigma = \ldots \pm \ldots .$$

Klausimai ir užduotys

1. Kokia yra skysčio paviršiaus įtempties koeficiento prasmė?

2. Kaip kinta vandens paviršiaus įtempties koeficientas, didinant vandens temperatūrą?

3. Kodėl su muilu ar kitomis skalbimo priemonėmis skalbiniai išskalbiami švariau negu vien su vandeniu?

4. Su kokiu vandeniu – šaltu ar šiltu – nusiprausiama švariau? Atsakymą pagrįskite.

5. Kodėl virtuvėje ant stalo palikti sausainiai suminkštėja, o pyrago riekelės pasidaro traškios?

11 laboratorinis darbas

Gumos tamprumo modulio nustatymas

Darbo tikslas: bandymais nustatyti gumos tamprumo modulį.

Teorinis darbo pagrindimas. Atlikdami šį darbą, tirsime tempimo deformaciją. Ją apibūdina absoliutusis pailgėjimas, kuris lygus deformuojamo kūno galinio ilgio l ir pradinio ilgio l_0 skirtumui:

$$\Delta l = l - l_0. \qquad (1)$$

Tempimo deformaciją galima apibūdinti ir santykiniu pailgėjimu. Jis lygus kūno absoliučiojo pailgėjimo Δl ir pradinio ilgio l_0 santykiui:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (2)$$

Mechaninio įtempio priklausomybę nuo kūno santykinio pailgėjimo, kai deformacija maža, nusako Huko dėsnis: kai kūnas mažai deformuojasi, mechaninis įtempis σ yra tiesiogiai proporcingas kūno santykiniam pailgėjimui ε:

$$\sigma = E\left|\varepsilon\right|; \quad (3)$$

čia E – tamprumo modulis. Jis nustatomas bandymais. Išmatavus mechaninį įtempį σ ir kūno santykinį pailgėjimą ε, kai deformacija maža, tamprumo modulis apskaičiuojamas pagal formulę

$$E = \frac{\sigma}{\left|\varepsilon\right|}. \quad (4)$$

Atsižvelgus į tai, kad $\sigma = \frac{F}{S}$, gaunama tokia tamprumo modulio išraiška:

$$E = \frac{F \cdot l_0}{S \cdot \Delta l} = \frac{4F \cdot l_0}{\pi D^2 (l - l_0)}. \quad (5)$$

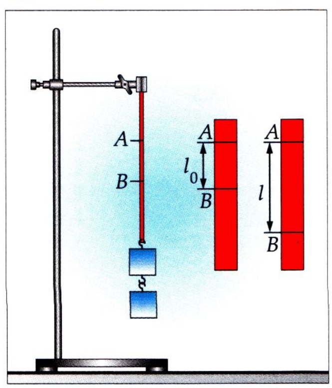
Vadinasi, norint bandymais nustatyti medžiagos tamprumo modulį, reikia išmatuoti fizikinius dydžius l_0, l, F ir D.

Darbo priemonės: 1) stovas su laikikliu; 2) svarstyklės; 3) pasvarai; 4) guminė juostelė; 5) slankmatis; 6) milimetrinė liniuotė.

Darbo eiga

1. Ant guminės juostelės nubrėžkite du brūkšnelius A ir B ir liniuote išmatuokite atstumą l_0 tarp jų.
2. Guminę juostelę pritvirtinkite prie stovo laikiklio (1 pav.).
3. Pasverkite pasvarus. Žinodami jų masę, galėsite nesunkiai apskaičiuoti tamprumo jėgą. Kai pasvarai yra pusiausviri, tamprumo jėga F, atsiradusi deformuotoje juostelėje, lygi prikabintus pasvarus veikiančiam sunkiui mg.
4. Prie apatinio juostelės galo prikabinkite pasvarus ir išmatuokite atstumą l tarp brūkšnelių.
5. Slankmačiu išmatuokite ištemptos juostelės skersmenį D.

1 pav.



6. Užpildykite matavimo rezultatų lentelę:

l_0, m	l, m	D, m	F, N

7. Pagal (5) formulę apskaičiuokite gumos tamprumo modulį.

8. Apskaičiuokite tamprumo modulio santykinę ir absoliučiąją paklaidą:

$$\varepsilon = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta l_0}{l_0} + 2 \cdot \frac{\Delta D}{D} + 2 \cdot \frac{\Delta l}{l - l_0},$$

$$\Delta E = E_{ap}\varepsilon.$$

9. Užpildykite skaičiavimų ir paklaidų lentelę:

$\Delta_{pr}l$, m	$\Delta_a l$, m	Δl, m	$\Delta_{pr}D$, m	$\Delta_a D$, m	ΔD, m	$\Delta_{pr}F$, m	$\Delta_a F$, m	ΔF, m	E, Pa	ε, %	ΔE, Pa

10. Parašykite laboratorinio darbo išvadą.

Klausimai ir užduotys ??

1. Ar skiriasi iš tos pačios gumos pagaminto kamuoliuko ir juostelės tamprumo moduliai? Atsakymą pagrįskite.

2. Kokia yra tamprumo modulio fizikinė prasmė? Kuo šis fizikinis dydis panašus į elektrinę varžą?

3. Kuo skiriasi medžiagos tamprumo modulis nuo kūno standumo koeficiento?

4. Žalvarinė 0,8 mm skersmens ir 3,6 m ilgio viela, veikiama 25 N jėgos, pailgėja 2 mm. Apskaičiuokite žalvario tamprumo modulį.

Priedai

1. ŠILUMINĖS MEDŽIAGŲ SAVYBĖS

Kietieji kūnai

Medžiaga	Savitoji šiluma, kJ/(kg · K)	Lydymosi temperatūra, °C	Savitoji lydymosi šiluma, kJ/kg
Alavas	0,23	232	59
Aliuminis	0,88	600	380
Ledas	2,1	0	330
Plienas	0,46	1400	82
Sidabras	0,23	960	87
Švinas	0,13	327	25
Varis	0,38	1083	180

Skysčiai

Medžiaga	Savitoji šiluma, kJ/(kg · K)	Virimo temperatūra, °C	Savitoji garavimo šiluma[1], MJ/kg
Alkoholis	2,4	78	0,85
Gyvsidabris	0,12	357	0,29
Vanduo	4,2	100	2,3

Dujos

Medžiaga	Savitoji šiluma[2], kJ/(kg · K)	Kondensacijos temperatūra[1], °C
Azotas	1,0	–196
Deguonis	0,92	–183
Oras	1,0	–
Vandenilis	14	–252

[1] Kai slėgis normalus.
[2] Kai slėgis pastovus.

2. SOČIŲJŲ VANDENS GARŲ SLĖGIS p IR TANKIS ρ, KAI TEMPERATŪRA ĮVAIRI

t, °C	p, mm Hg	ρ, kg/m³	t, °C	p, mm Hg	ρ, kg/m³
–10	1,95	$2,14 \cdot 10^{-3}$	17	14,5	$1,45 \cdot 10^{-2}$
–5	3,01	$3,24 \cdot 10^{-3}$	18	15,5	$1,54 \cdot 10^{-2}$
–4	3,28	$3,51 \cdot 10^{-3}$	19	16,5	$1,63 \cdot 10^{-2}$
–3	3,57	$3,81 \cdot 10^{-3}$	20	17,5	$1,73 \cdot 10^{-2}$
–2	3,88	$4,13 \cdot 10^{-3}$	21	18,7	$1,83 \cdot 10^{-2}$
–1	4,22	$4,47 \cdot 10^{-3}$	22	19,8	$1,94 \cdot 10^{-2}$
0	4,6	$4,8 \cdot 10^{-3}$	23	21,1	$2,06 \cdot 10^{-2}$
1	4,9	$5,2 \cdot 10^{-3}$	24	22,4	$2,18 \cdot 10^{-2}$
2	5,3	$5,6 \cdot 10^{-3}$	25	23,8	$2,30 \cdot 10^{-2}$
3	5,7	$6,0 \cdot 10^{-3}$	26	25,2	$2,44 \cdot 10^{-2}$
4	6,1	$6,4 \cdot 10^{-3}$	27	26,7	$2,58 \cdot 10^{-2}$
5	6,6	$6,8 \cdot 10^{-3}$	28	28,4	$2,72 \cdot 10^{-2}$
6	7,0	$7,3 \cdot 10^{-3}$	29	30,0	$2,87 \cdot 10^{-2}$
7	7,5	$7,8 \cdot 10^{-3}$	30	31,8	$3,03 \cdot 10^{-2}$
8	8,0	$8,3 \cdot 10^{-3}$	40	55,3	$5,12 \cdot 10^{-2}$
9	8,6	$8,8 \cdot 10^{-3}$	50	92,5	$8,30 \cdot 10^{-2}$
10	9,2	$9,4 \cdot 10^{-3}$	60	149,4	$1,30 \cdot 10^{-1}$
11	9,8	$1,00 \cdot 10^{-2}$	80	355,1	$2,93 \cdot 10^{-1}$
12	10,5	$1,07 \cdot 10^{-2}$	100	760,0	$5,98 \cdot 10^{-1}$
13	11,2	$1,14 \cdot 10^{-2}$	120	1489,0	1,123
14	12,0	$1,21 \cdot 10^{-2}$	160	4636	3,259
15	12,8	$1,28 \cdot 10^{-2}$	200	11 661	7,763
16	13,6	$1,36 \cdot 10^{-2}$			

3. SAVITOJI KURO DEGIMO ŠILUMA, MJ/kg

Akmens anglys	29	Medis	10
Alkoholis	29	Parakas	3,8
Benzinas	46	Žibalas	46
Dyzeliniai degalai	42		

4. PSICHROMETRINĖ LENTELĖ

Sauso termo-metro rodmuo		**Sauso ir drėkinamo termometrų rodmenų skirtumas, °C**											
K	°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Santykinis drėgnis, %												
273	0	100	82	63	45	28	11						
	1	100	83	65	48	32	16						
	2	100	84	68	51	35	20						
	3	100	84	69	54	39	24	10					
	4	100	85	70	56	42	28	14					
278	5	100	86	72	58	45	32	19	6				
	6	100	86	73	60	47	35	23	10				
	7	100	87	74	61	49	37	26	14				
	8	100	87	75	63	51	40	28	18	7			
	9	100	88	76	64	53	42	31	21	11			
283	10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4		
	11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8		
	12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11		
	13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6	
	14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9	
288	15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	5
	16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15	8
	17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17	10
	18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20	13
	19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	15
293	20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	18
	21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	20
	22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	22
	23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30	24
	24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	26
298	25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	27

5. KAI KURIŲ SKYSČIŲ PAVIRŠIAUS ĮTEMPTIES KOEFICIENTAS (kai temperatūra 20 °C)

Medžiaga	**σ, N/m**	**Medžiaga**	**σ, N/m**
Acetonas	0,024	Ricinos aliejus	0,033
Benzinas	0,029	Terpentinas	0,027
Etilo alkoholis	0,022	Vanduo	0,072
Gyvsidabris	0,470	Vario sulfato tirpalas	0,074
Muilo tirpalas	0,040	Žibalas	0,024

6. KAI KURIŲ MEDŽIAGŲ TAMPRUMO MODULIS

Medžiaga	***E*, Pa**	**Medžiaga**	***E*, Pa**
Aliuminis	$7 \cdot 10^{10}$	Plyta	$2{,}8 \cdot 10^{10}$
Betonas	$2 \cdot 10^{10}$	Švinas	$1{,}7 \cdot 10^{10}$
Geležis	$2 \cdot 10^{11}$	Varis	$1{,}2 \cdot 10^{11}$
Ketus	$9 \cdot 10^{10}$	Žalvaris	$1{,}1 \cdot 10^{11}$
Plienas	$2{,}2 \cdot 10^{11}$		

7. KAI KURIŲ MEDŽIAGŲ DIELEKTRINĖ SKVARBA

Medžiaga	ε	Medžiaga	ε
Benzinas	2,3	Porcelianas	4–7
Ebonitas	2,7	Stiklas	5–10
Gintaras	2,8	Transformatorinė alyva	2,2–2,5
Glicerolis	39	Vakuumas	1
Guma	2–3	Vanduo (20 °C)	81
Ledas (–18 °C)	3,2	Vanduo (0 °C)	88
Oras (1 atm)	1,0006	Vaškas	5,8
Oras (100 atm)	1,055	Žėrutis	6–9
Parafinuotas popierius	2,0	Žibalas	2,0

8. KARTOTINIŲ IR DALINIŲ VIENETŲ SUDARYMAS

Santykis su pagrindiniu vienetu	Priešdėlis	Simbolis	Santykis su pagrindiniu vienetu	Priešdėlis	Simbolis
10^{12}	tera-	T	10^{-2}	centi-	c
10^{9}	giga-	G	10^{-3}	mili-	m
10^{6}	mega-	M	10^{-6}	mikro-	μ
10^{3}	kilo-	k	10^{-9}	nano-	n
10^{2}	hekto-	h	10^{-12}	piko-	p
10	deka-	da	10^{-15}	femto-	f
10^{-1}	deci-	d	10^{-18}	ato-	a

9. FIZIKINIAI DYDŽIAI IR JŲ MATAVIMO VIENETAI

Fizikinis dydis	Pagrindinis matavimo vienetas	
	Pavadinimas	Simbolis
Judesio kiekis	kilogrammetras sekundei	kg · m/s
Jėgos momentas	niutonmetras	N · m
Darbas, energija	džaulis	J
Galia	vatas	W
Temperatūra	kelvinas	K
Šiluma (šilumos kiekis)	džaulis	J
Savitoji šiluma	džaulis kilogramui kelvinui	J/(kg · K)
Savitoji lydymosi, garavimo šiluma	džaulis kilogramui	J/kg
Slėgis	paskalis	Pa
Paviršiaus įtempties koeficientas	niutonas metrui	N/m
Mechaninis įtempis	paskalis	Pa
Tamprumo modulis	paskalis	Pa
Elektros krūvis	kulonas	C
Elektrinio lauko stipris	voltas metrui	V/m
Elektrinis potencialas	voltas	V
Elektrinė įtampa	voltas	V
Elektrinė talpa	faradas	F

10. FIZIKOS KONSTANTOS

Konstanta, dydis	Žymėjimas	Vertė
Šviesos greitis tuštumoje	c	299 792 km/s
Gravitacijos konstanta	G	$6{,}672 \cdot 10^{-11}$ N · m²/kg²
Avogadro skaičius	N_A	$6{,}02 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}
Bolcmano konstanta	k	$1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K
Universalioji dujų konstanta	R	8,31 J/(mol · K)
Elektrinė konstanta	ε_0	$8{,}85 \cdot 10^{-12}$ $C^2/(N \cdot m^2)$

Naudota literatūra

Buchovcevas B., Klimontovičius J., Miakiševas G. Fizika: Vadovėlis IX–X klasei. Kaunas, 1984.
Charlot R., Cros A., Walter C. Fondaments de la physique 2e CT. Paris, 1978.
Dindorf W. Fyzika i astronomia. Moja fyzika. Warszawa, 2002.
Dobson K., Grace D., Lovett D. Fizika: Išplėstinis ir tikslinis kursai 11–12 klasei. 1 dalis. Vilnius, 2001.
Fisica Y. Quimica 3 eso / *Baeza D., Delgado A. M., Galindo E.* Barselona, 1995.
Fizika i astronomija 7 / *Pinskij A. A., Razumovskij V. G., Dik J. I.* i dr. Moskva, 1998.
Focus op de fysica / *Clippelier K. D., Frans K., Hofkens J.* België, 1991.
Gamtos mokslai / *Lale H., Daniel A., Duke M.* Vilnius, 1997.
Garcia T., Ebedé E. Fisica eso 4 2n. Barselona, 1998.
Hebert A., Bodin J. Sciences physiques 21. Paris, 1989.
Kabardinas O. Fizika: Informacinė medžiaga. Kaunas, 1998.
Karazija R. Fizika humanitarams. I dalis. Klasikinė fizika. Vilnius, 1996.
Kasjanov V. A. Fizika 10. Moskva, 2002.
Kikoinas I., Kikoinas A. Fizika: Vadovėlis IX klasei. Kaunas, 1987.
Kikoinas I., Kikoinas A. Fizika: Vadovėlis X klasei. Kaunas, 1994.
Miakiševas G., Buchovcevas B. Fizika: Vadovėlis XI klasei. Kaunas, 1979.
Miakiševas G., Buchovcevas B. Fizika: Vadovėlis X–XI klasei. Kaunas, 1991.
Pfysique chimie 2de / *Bouland A., Caurvet J., Fay J.* Paris, 1997.
Physik 9/10: Natur und Technik / *Heepmann B., Kunze W., Muckenfuß H.* u. a. Berlin, 1992.
Rymkevičius A. Fizikos uždavinynas IX–XII klasei. Kaunas, 1993.
Vičas S. Fizikos uždavinynas XI–XII klasei. Kaunas, 2000.

Panaudotų iliustracijų šaltiniai

Dobson K., Grace D., Lovett D. Fizika. Išplėstinis ir tikslinis kursai 11–12 klasei. I dalis. Vilnius, 2001.
Karazija R. Įžymūs fizikai ir jų atradimai. Kaunas, 2002.
Raudonis R. Chemija: Vadovėlis VIII klasei. Kaunas, 2001.
Romualdo Požerskio nuotrauka (7.9.4 pav.)
Dovilio Paliuko nuotrauka (11.7.4 pav.)
Eriko Ovčarenko nuotraukos (7.8.2, 12.6.1 ir 13.4.4 pav.)
Arvydo Knystauto nuotrauka (13.2.11 pav.)
Photo disc
http://www.webshots.com
http://www.greenhill.org/athletics/Archive/2003_04/spring/track/photos/SPC_Track04/SPC_244.jpg
http://www.ehn.es/fotos/galeria_eolica33300.jpg
http://www.ehn.es/esp/imagenes/galeria_eolica02300.jpg
http://www.eksponente.lt/vejas (Aleksandro Paulausko nuotrauka)
http://www.planetearthhome.com/N-SW.jpg
http://sxc.hu/browse.phtml?f=view&id=209309
http://a248.e.akamai.net/7/248/431/20040601145509/www.msd-newzealand.com/content/downloads/
Propecia%20Rally%20branded%20selection% 20004.jpg
http://www.tuningnews.net/gallery/hfp-honda-civic-si/hfp-honda-civic-si-07.jpg
http://www.civeng.carleton.ca/Exhibits/Tacoma_Narrows/DSmith/fig06.gif
http://www.civeng.carleton.ca/Exhibits/Tacoma_Narrows/DSmith/fig09.gif
http://www.civeng.carleton.ca/Exhibits/Tacoma_Narrows/DSmith/fig11.gif
http://sxc.hu/browse.phtml?f=view&id=165282)
http://www.prweb.com/prfiles/2005/01/14/198034/Syntax_LCDTV_32_37.jpg
http://www.ixbt.com/mainboard/msi/mega-pc/mega-pc-hifi-mode.jpg
http://www.samsung.com/at/presscenter/images/cebit/download/SGH_1700_1_l.jpg
http://www.dpreview.com/news/0409/olympus/umini-frontback.jpg
http://www.math.ucdavis.edu/~pyan/pics/7.20/DSC01496.jpg
http://www.state.in.us/idem/air/programs/imsite_new/image/DualExhaust01.jpg
http://www.utexas.edu/research/ceer/texaqs/images/downtown_view2.jpg
http://www.utexas.edu/research/ceer/texaqs/images/hazy_downtown_view.jpg
http://www.emol.com/modulos/salon2004/galeria/galeria2/toyota-prius-001024.jpg
http://www.sil.si.edu/digitalcollections/hst/scientific-identity/fullsize/SIL14-F001-04a.jpg
http://www.asst.ch/PIONNIERS/01.Einstein.full.01.jpg
http://www.th.physik.uni-frankfurt.de/~jr/gif/phys/carnot.jpg
http://www.engrlib.uc.edu/images/scientists/coulomb.jpg
http://perso.wanadoo.fr/michel.steiner/images/pecimage/imagestir/emile1.gif
http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=888129
http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=409860
http://www.musz.hu/musz/musz_files/File/EB2006/valogatas/Szinkronuszas/060728-28-SZJ.JPG
http://image16.webshots.com/16/9/69/13/177896913GadyGa_ph.jpg
http://www.underpressure.com.au/web-content/Images/Alustar.jpg
http://www.linseis.com/DSP-990low.jpg
http://image58.webshots.com/458/8/24/50/2443824500053828486qewGBg_ph.jpg
http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=510966
http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=547860
http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=47307
http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=814469
http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=657166
http://www.meteodesorres.com/images/Photo%20073.jpg
http://www.annee-polaire.fr/var/plain/storage/images/ipev/galerie/arctique/operations_scientifiques/
montgolfiere_infra_rouge_pour_etudes_meteo_et_atmospheriques_suede/5932-2-fre-FR/
montgolfiere_infra_rouge_pour_etudes_meteo_et_atmospheriques_suede.jpg
http://www.uni-koeln.de/math-nat-fak/geomet/meteo/winfos/euisoTTPPWW.gif
http://85.214.49.20/wz/pics/m7slp.jpg
http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=220145
http://www.sxc.hu/browse.phtml?f=download&id=460813
http://www.brandandrae.co.uk/images/products/blocks/00000000014/01.big.jpg
http://manager.soline.ru/corian/upload/wysiwyg/91%20(2).jpg
http://www.countertoptrends.com/kessler1.jpg
http://automatix.physik.uos.de/~jgemmer/Bilder/boltzmann2.jpg

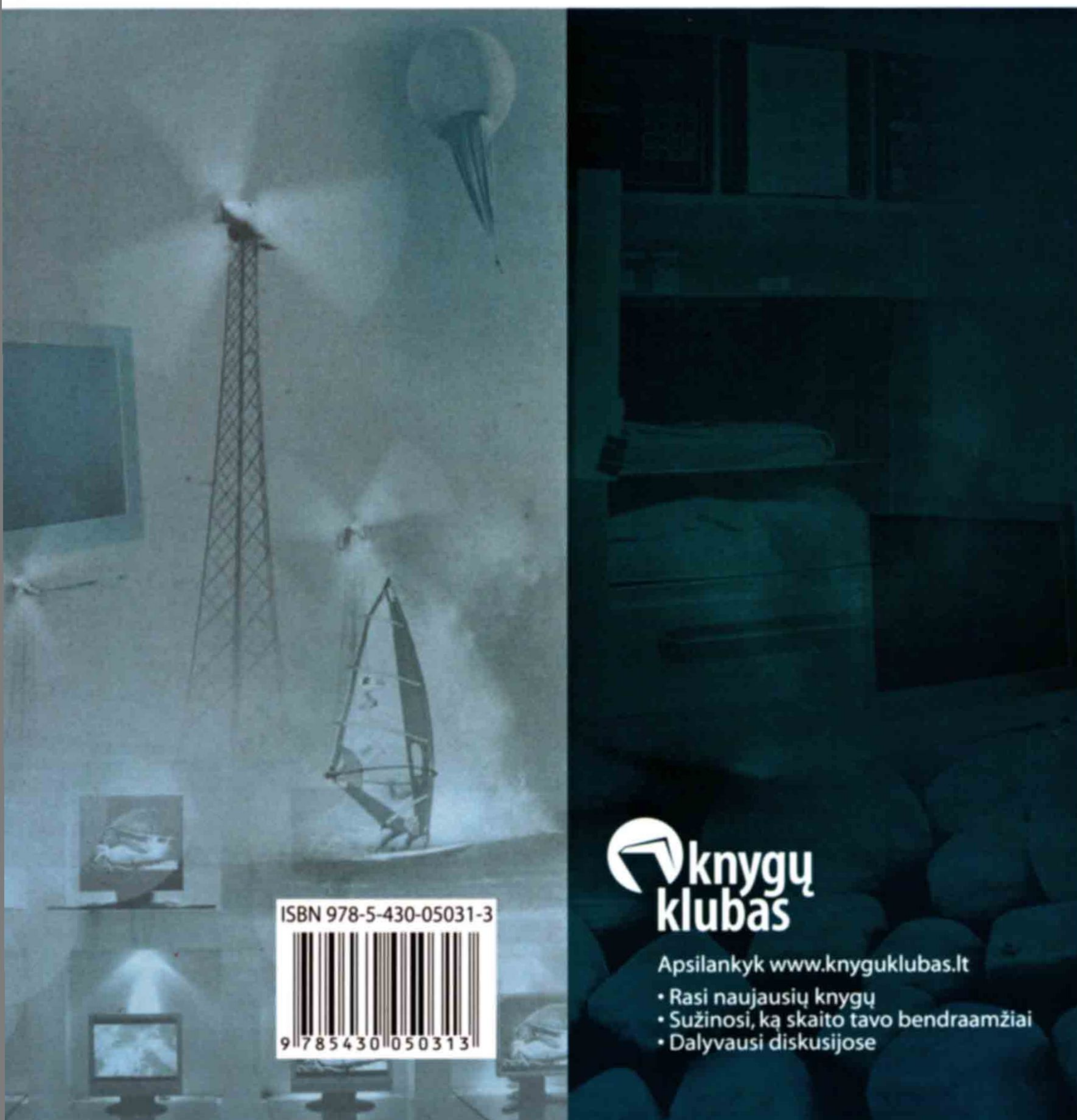
Dalykinė ir pavardžių rodyklė

VADOVĖLIO KORTELĖ

Eil. Nr.	Mokinio vardas ir pavardė	Mokslo metai	Vadovėlio išvaizda (l. gera, gera, patenkinama)	
			mokslo metų pradžioje	mokslo metų pabaigoje

BRANGINKITE IR TAUSOKITE VADOVĖLIUS!

Tai – antroji fizikos vadovėlio XI klasei knyga, skiriama mokiniams, kurie pasirinko išplėstinį fizikos kursą. Joje nagrinėjami tvermės dėsniai mechanikoje, mechaniniai svyravimai, garsas, šiluminiai reiškiniai ir elektrostatika. Šios, kaip ir pirmosios, knygos pabaigoje rasite su nagrinėjamomis temomis susijusių laboratorinių darbų aprašymus. Kiekvieno skyriaus paskutinėje, pažintinėje, temoje pateikta informacija papildo skyriaus medžiagą, susieja ją su praktine patirtimi, artimiausioje aplinkoje vykstančiais reiškiniais, mokslo ir technikos pažanga, ekologinėmis problemomis.



ISBN 978-5-430-05031-3